
Entwicklung von Modifikationsregeln zur Reduktion der Schallabstrahlung dünnwandiger Strukturen im Entwicklungsprozess

Beim Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte
DISSERTATION

vorgelegt von

Clarissa Schaal, M.Sc.

aus Bad Kreuznach

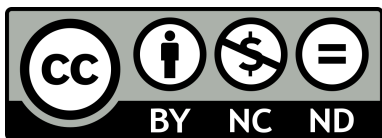
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer
Tag der Einreichung:	16.07.2018
Tag der mündlichen Prüfung:	23.10.2018

Darmstadt 2018

D17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-81700
<https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/8170>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,
E-Publishing-Service der TU Darmstadt
<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>
tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:
Namensnennung – keine kommerzielle Nutzung – keine Bearbeitung 4.0 international
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

Kurzfassung

Treten im fortgeschrittenen Entwicklungsprozess Akustikprobleme in Form zu hoher Schallabstrahlung auf – bspw. durch den Einsatz einer neuen Produktkomponente –, ist eine Neuauslegung der Produktgeometrie meist nicht wirtschaftlich – kleinere, lokal begrenzte Modifikationen sind es hingegen schon. Bei dünnwandigen Strukturen werden bisher am fertigen Produkt häufig Dämpfungsbeläge appliziert, um die auftretenden unerwünschten Schwingungen zu vermindern und damit die Schallabstrahlung zu reduzieren. Ziel dieser Arbeit ist es, Modifikationsregeln zu entwickeln, die noch im Entwicklungsprozess aufzeigen, an welchen Positionen dünnwandige Strukturen selbst so verändert werden sollten (kleine Massen- und/oder Steifigkeitserhöhungen), dass die unerwünschten Schwingungen erst gar nicht oder nur in abgeschwächter Form entstehen. Das Aufbringen von Dämpfungsbelägen für eine weitere Schallreduktion wäre weiterhin möglich. Zwei vielversprechende Ansätze, um solche Modifikationsregeln abzuleiten, werden in dieser Arbeit mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) an den Modellen einer Platte und eines Gepäckraumbodens untersucht.

Ein Ansatz ist die Analyse der Strukturintensität (STI) – der Energiefluss des Körperschalls –, da dieser Ansatz gemäß der Literatur ein großes Potenzial für die lärmarme Konstruktion aufweist. Dabei werden zunächst Zusammenhänge zwischen der STI und der Schallabstrahlung ermittelt, um daraus Modifikationsregeln abzuleiten. Hierzu werden zur Reduktion der Informationsdichte und damit zur Charakterisierung der STI-Vektorfelder skalare Kenngrößen aufgestellt und mit der Schallabstrahlung korreliert. Anhand der ermittelten Zusammenhänge und unter Einbeziehung von Forschungsergebnissen aus der Literatur wird eine Hypothese für eine Modifikationsregel aufgestellt und untersucht.

Im zweiten Ansatz werden systematisch die Zusammenhänge zwischen der Position einer Modifikation und der resultierenden Schallabstrahlung untersucht. Dafür wird zunächst die Position einer lokal begrenzten Modifikation schrittweise auf den Basismodellen Platte und Gepäckraumboden variiert, um jeweils eine Modellbasis aufzubauen. Anschließend werden die Zusammenhänge zwischen den Positionen und der jeweils resultierenden äquivalent abgestrahlten Schallleistung (ERP) mittels sogenannter ERP-Skalarfelder visualisiert. Zur Entwicklung der Modifikationsregeln wird in der Folge überprüft, ob die ERP-Skalarfelder als „Landkarten“ zur Lokalisierung sinnvoller Positionen für flächige und damit praxisnahe schallreduzierende Modifikationen verwendet werden können. Im Anschluss daran wird untersucht, wie sich die ERP-Skalarfelder durch Strukturgrößen der Basismodelle approximieren und somit direkt, ohne den aufwändigen Aufbau einer Modellbasis, vorhersagen lassen.

Die Untersuchungen zeigen, dass mittels einiger aus der STI-Analyse stammender skalarer Kenngrößen die Schallabstrahlung von Strukturen bewertet werden kann. Weiterhin können anhand der systematischen Analyse des Zusammenhangs zwischen der Position von Modifikationen und der resultierenden Schallabstrahlung Modifikationsregeln für eine Schallreduktion entwickelt und sowohl numerisch als auch experimentell erfolgreich validiert werden. Erstmals wird es dadurch möglich, im Entwicklungsprozess oder im Rahmen von Korrekturen am fertigen Produkt gezielt bestimmen zu können, wo bei einer Struktur eine kleine Massen- und/oder Steifigkeitserhöhung die Schallabstrahlung deutlich reduziert. Darüber hinaus ist die vorgestellte Vorgehensweise geeignet, um als Methode zur Entwicklung weiterer Modifikationsregeln – systematische Untersuchung anderer Modifikationsarten wie z. B. einer Materialwegnahme – verwendet zu werden.

Abstract

Acoustic problems such as a high sound radiation can arise later in the development process, e.g., due to a change of a component. Usually, at this stage, it is uneconomic to completely redesign the product's geometry, rather, it is better to implement small, locally limited modifications. In the case of thin-walled structures it is common to apply damping patches to the finished product in order to reduce the unwanted vibrations that occur and, thus, the radiated sound. The aim of this work is to develop modification rules for dealing with acoustic problems of thin-walled structures. Using these rules, the structures themselves can be modified during the development process in order to prevent unwanted vibrations from appearing at all. These rules are intended to indicate at which positions small modifications in the form of additional mass and/or stiffness result in a considerable reduction of the sound radiation. It would also be possible to include additional damping patches for a further noise reduction. There are two approaches that appear promising to derive such modification rules. Both are analyzed in this work, using the finite element method (FEM) – first on a plate and then for validation on a trunk floor panel (basic models).

The first approach chosen is the analysis of the structural intensity (STI), which is the energy flow of structure-borne sound. There have been STI analysis approaches found in recent literature that exhibit a large potential for low-noise construction. The aim is to identify connections between the STI and the sound radiation, in order to derive modification rules. To do this, scalar quantities are first set up in order to reduce the information density and, thus, to characterize the STI vector fields and then correlated with the sound radiation. On the basis of the established correlations and including research results from the literature, a hypothesis for a modification rule is posed and tested.

As for the second approach, it is practical to systematically examine the relationship between the position of a modification and the resulting sound radiation. First, the position of a localized modification is gradually varied on the two basis models of the plate and the trunk floor panel, in order to build up a model basis each. Then, the relationships between the positions and the resulting equivalent radiated sound power (ERP) are visualized by means of so-called ERP scalar fields. In order to develop the modification rules, it will subsequently be examined whether the ERP scalar fields can be used as "maps" to locate meaningful positions for larger and, therefore, more effective sound-reducing modifications. Lastly, it will be examined how the ERP scalar fields can be approximated by structural quantities of the basic models themselves and, thus, be directly predicted, without the effort of building up the model bases.

The investigations show that the sound radiation of structures can indeed be evaluated by means of some scalar quantities derived from the STI analysis. Furthermore, the systematic analysis of the relationship between the position of modifications and the resulting sound radiation can be used to develop modification rules for sound reduction, which are then successfully validated experimentally as well as numerically. For the first time, it is possible to specifically determine where on a structure a small increase of mass and/or stiffness considerably reduces the sound radiation either during the development process or during alterations to the finished product. Moreover, the second approach presented is suitable for the use as a method for developing further modification rules by means of a systematic investigation of other modification types such as a removal of material.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Stand der Forschung.....	2
1.3	Zielsetzung und methodisches Vorgehen	9
2	Grundlagen	13
2.1	Bestimmung der Strukturintensität in dünnwandigen Strukturen	13
2.2	Bestimmung der Schallabstrahlung	15
2.3	Prinzipien zur Reduktion der Schallabstrahlung.....	18
3	Analysemethode, Modellaufbau und Voruntersuchung	20
3.1	Vorstellung der Analysemethode zur Bestimmung der betrachteten Strukturgrößen.....	20
3.2	Vorstellung der verwendeten Basismodelle und Modifikationen	22
3.2.1	Aufbau und Strukturverhalten der numerischen Modelle	22
3.2.2	Aufbau der numerischen Modifikationen.....	28
3.2.3	Aufbau des Prüfstands und Strukturverhalten des experimentellen Modells	28
3.3	Voruntersuchung zur Eignung der äquivalent abgestrahlten Schallleistung als qualitative Bewertungsgröße von Modifikationen.....	33
3.3.1	Aufbau der numerischen Luftschallmodelle	34
3.3.2	Vergleich der Änderungen von ERP und Schallleistung aufgrund von Modifikationen	36
4	Untersuchungen zur Entwicklung von Modifikationsregeln anhand der Strukturintensität	39
4.1	Analyse skalarer Kenngrößen zur Charakterisierung der STI-Vektorfelder.....	39
4.1.1	Definition STI-basierter skalarer Kenngrößen.....	40
4.1.2	Gruppierung und Auswahl STI-basierter skalarer Kenngrößen.....	42
4.1.3	Korrelation der STI-basierten, skalaren Kenngrößen mit der ERP	44
4.2	Positionierung von Modifikationen auf Basis der STI.....	50
4.2.1	Aufstellen einer Hypothese für eine STI-basierte Modifikationsregel.....	50
4.2.2	Aufbau der modifizierten Modelle	52
4.2.3	Untersuchung der aufgestellten Hypothese.....	55
4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	58
5	Entwicklung von Modifikationsregeln anhand einer systematischen Strukturanalyse	60
5.1	Erstellung der Modellbasen.....	62
5.2	Visualisierung des Zusammenhangs zwischen den Modifikationen und der resultierenden ERP durch die Erstellung von ERP-Skalarfeldern	63
5.3	Positionierung von Modifikationen auf Basis unterschiedlich erzeugter ERP-Skalarfelder.	69
5.3.1	Massenerhöhungen	71
5.3.2	Steifigkeitserhöhungen.....	78
5.3.3	Massen- und Steifigkeitserhöhungen	81
5.4	Vergleich der Ergebnisse mit Modifikationsergebnissen auf Basis von Expertenwissen	85

5.5	Ableitung von Modifikationsregeln durch Approximation der unterschiedlichen ERP-Skalarfelder anhand der Strukturgrößen der Basismodelle.....	87
5.5.1	Auswahl des Regressanden und der Regressoren	88
5.5.2	Vorgehensweise zur Approximation der ERP-Skalarfelder	89
5.5.3	Ergebnisse der Approximation der ERP-Skalarfelder	92
5.5.4	Ableitung von Modifikationsregeln durch Analyse der einzelnen Regressionslösungen ...	95
5.6	Validierung der abgeleiteten Modifikationsregeln	99
5.6.1	Anwendung an den verwendeten Basismodellen	99
5.6.2	Anwendung an einem weiteren Modell.....	103
5.6.3	Experimentelle Validierung	106
5.7	Diskussion der Ergebnisse.....	110
6	Zusammenfassung und Ausblick	114
A	Anhang	118
A.1	Ergänzungen zum Basismodell der Platte	118
A.2	Ergänzungen zum Basismodell des Gepäckraumbodens.....	121
A.3	Ergänzungen zum experimentellen Basismodell der Platte	125
A.4	Ergänzungen zum Luftmodell.....	126
A.5	Berechnungsgleichungen der skalaren Kenngrößen	127
A.6	Darstellung der Korrelation der STI-basierten skalaren Kenngrößen miteinander.....	128
A.7	Ergänzungen zu den STI-basierten Strukturmodifikationen	129
A.8	ERP-Skalarfelder der Platte	130
A.9	ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens	133
A.10	Ergänzungen zu den Strukturmodifikationen basierend auf den ERP-Skalarfeldern	137
A.11	Verwendete Optimierungseinstellungen des genetischen Algorithmus	138
	Abbildungsverzeichnis	139
	Tabellenverzeichnis	145
	Abkürzungsverzeichnis	146
	Symbolverzeichnis	147
	Literaturverzeichnis	154

1 Einleitung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung von Modifikationsregeln zur Reduktion der Schallabstrahlung dünnwandiger Strukturen im Entwicklungsprozess. Dafür wird zunächst motiviert, in welchen Bereichen solche Modifikationsregeln hilfreich wären und welchen Vorteil sie gegenüber herkömmlichen Lösungen zur Reduktion der Schallabstrahlung besitzen. Anschließend wird ein Überblick über den Stand der Forschung bzgl. Designmethoden im Bereich der Schallreduktion sowie über die dabei üblicherweise betrachteten Zielgrößen gegeben. Zuletzt werden die konkrete Zielsetzung dieser Arbeit in Abgrenzung zum Stand der Forschung sowie das methodische Vorgehen zum Erreichen dieser Zielsetzung beschrieben.

1.1 Motivation

Die Akustik von Produkten rückt zunehmend in den Fokus der Produktentwicklung, da eine geringe Schallabstrahlung aufgrund gesetzlicher Vorgaben relevant ist oder als Qualitätsmerkmal gilt [1, S. 307]. Gesetzliche Lärmgrenzen betreffen in der Regel nicht die Schallemission spezifischer Produkte, sondern regeln die Schallimmission an Orten, an denen Menschen diesem Schall ausgesetzt sind. So gibt es beispielsweise zum Schutz von Arbeitnehmern rechtliche Vorgaben zum erlaubten Lärm am Arbeitsplatz [2]. Die Bewertung der Produktqualität durch den Kunden/die Kundin oder den Hersteller anhand der Schallemission des jeweiligen Produktes breitet sich seit Jahren auf immer weitere Produktkategorien aus. Je mehr die eigentliche(n) Funktionalität(en) eines Produktes zum Standard wird (werden), umso mehr treten andere Eigenschaften – wie auch die Schallabstrahlung – in den Fokus des Herstellers, um sich mit dem Produkt bspw. von Konkurrenzprodukten abzugrenzen [3]. Die Beispiele hierfür sind zahlreich; sie umfassen leisere Haushaltsgeräte wie die Waschmaschine oder den Staubsauger, leisere Arbeitsgeräte wie den Laubbläser oder auch leisere Kraftfahrzeuge.

Trotz einer frühen Berücksichtigung der Akustik in der Produktentwicklung können auch im fortgeschrittenen Entwicklungsprozess Akustikprobleme in Form einer zu hohen Schallabstrahlung auftreten. Gründe hierfür können bspw. der Einsatz einer neuen Produktkomponente sein oder der Umstand, dass sich überschlägige Akustikprognosen aus früheren Phasen der Produktentwicklung als zu optimistisch herausstellen. Genaue Akustikprognosen in der frühen Produktentwicklung zu erstellen ist bspw. im Automobilbau weiterhin sehr schwierig [4, S. 456]. Kommt es zu einer zu hohen Schallabstrahlung im fortgeschrittenen Entwicklungsprozess, ist eine komplette Neuauslegung der Produktgeometrie meist nicht wirtschaftlich, da bereits viele Abhängigkeiten zwischen der Geometrie und Anforderungen anderer Bereiche als der Akustik, wie bspw. dem Design oder der Betriebsfestigkeit, bestehen. Eine Möglichkeit zur Problemlösung anstelle einer Neuauslegung sind lokal begrenzte Änderungen. Häufig werden bei dünnwandigen Strukturen, wie bspw. beim Pkw, am fertigen Produkt lokal Dämpfungsbeläge appliziert, um die auftretenden und unerwünschten Schwingungen zu mindern und damit die Schallabstrahlung zu reduzieren [4, S. 247], [5]. Die Dämpfungsbeläge erhöhen u. a. die Dämpfung, sodass die Energiedissipation der Schwingungsenergie steigt. Je nach Position der Dämpfungsbeläge dissipieren sie mehr oder weniger Energie und mindern die unerwünschten Schwingungen stärker oder weniger stark – führen in der Regel aber immer zu einer Reduktion der Schallabstrahlung. Für eine bestmögliche Ausnutzung der Dämpfungswirkung sind Dämpfungsbeläge in Bereichen hoher Dehnungsenergien zu platzieren [5].

Neben einer nachträglichen Erhöhung der Dämpfung am fertigen Produkt kann eine Struktur auch im Entwicklungsprozess noch durch die lokale Erhöhung von Masse oder Steifigkeit verändert werden. Solche „kleinen Änderungen“ der Struktur selbst können dazu führen, dass die unerwünschten Schwingungen erst gar nicht oder zumindest nur in abgeschwächter Form entstehen. Vorteilhaft bei diesem Ansatz ist zudem, dass dadurch eine anschließende weitere Reduktion der Schallabstrahlung durch eine zusätzliche Applikation von Dämpfungsbelägen nicht ausgeschlossen wird, sondern weiterhin möglich wäre. Entgegen der genannten Regel zur Lokalisierung optimaler Stellen für Dämpfungserhöhungen (Orte hoher Dehnungsenergien) gibt es keine solchen Regeln, welche die Lokalisierung optimaler Stellen für Massen- oder Steifigkeitsänderungen betreffen. Ziel dieser Arbeit ist es daher, zur Bewältigung von Akustikproblemen bei dünnwandigen Strukturen Modifikationsregeln zu entwickeln, die aufzeigen, an welchen Positionen eine „kleine“ Massen- und/oder Steifigkeitserhöhung zu einer deutlich verminderten Schallabstrahlung führt.

1.2 Stand der Forschung

Die in dieser Arbeit verwendete Bezeichnung „Designmethoden zur Schallreduktion“ spannt ein weites Feld an Methoden auf, die sich hinsichtlich mehrerer Aspekte, wie bspw. des Anwendungsbereichs oder der möglichen Designparameter, voneinander abgrenzen. Über eine kurze Beschreibung des vielfältigen Spektrums an unterschiedlichen Designmethoden wird zunächst der für diese Arbeit relevante Bereich hervorgehoben. Dabei bietet die Abgrenzung zu anderen Methoden eine gute Möglichkeit, die Eigenschaften der relevanten Designmethoden zu charakterisieren. Anschließend werden Forschungsarbeiten in diesem Bereich detaillierter beschrieben.

Die ersten veröffentlichten Ansätze zur Reduktion des abgestrahlten Schalls reichen zurück bis in das Jahr 1905. Bei den ersten online auffindbaren Ansätzen handelt es sich um US-Patente. So wurden in den Jahren 1905 und 1910 bspw. Ideen für Schalldämpfer zur Minimierung von „Explosionsgeräuschen“ in Verbrennungsmotoren eingereicht [6, 7] oder in den Jahren 1913–1915 Möglichkeiten zur Schallreduktion in Räumen durch die Verwendung von absorbierenden Materialaufbauten als Verkleidung der Wände und Decken aufgezeigt [8–10]. Diese Ideen dienen alle der Schallreduktion von bereits entstandenem Luftschall. Die Modifikationsregeln, die in dieser Arbeit entwickelt werden sollen, haben dagegen das Ziel, die Schallausbreitung bereits körperschallseitig zu reduzieren, sodass es dadurch bedingt zu einer reduzierten Luftschallabstrahlung kommt. Ein patentierter Ansatz, der in diese Richtung geht, wurde 1939 eingereicht [11], worin Konstruktionen zur Reduktion von Luft- und Körperschall in den Rümpfen oder Passagierkabinen von Flugzeugen beschrieben werden. In diesem US-Patent wird u. a. eine Möglichkeit aufgezeigt, wie die innere Kabine elastisch an der Außenhaut befestigt werden kann, sodass die Körperschallübertragung weitestgehend gedämmt werden kann und es dadurch im Inneren der Kabine leiser wird. Die Zielstellung in dieser Arbeit unterscheidet sich aber auch von diesem Ansatz dahingehend, dass keine konkrete Designlösung für einen speziellen Anwendungsfall entwickelt werden soll, sondern eine allgemeine Modifikationsregel, mit der ein bereits feststehendes Produktdesign im Entwicklungsprozess noch durch kleine Änderungen akustisch verbessert werden kann.

Es gibt unterschiedliche methodische Ansätze, welche die Schallabstrahlung mit dem Ziel einer struktureitigen Veränderung reduzieren. Diese Ansätze können zunächst in die Änderung des Strukturver-

haltens durch aktive oder durch passive Maßnahmen unterteilt werden. Aktive Maßnahmen erzielen über eine zusätzliche Aktorik eine Reduktion der Schallabstrahlung. Hierbei sind die zwei grundlegenden Konzepte AVC (aktive Schwingungskontrolle, active vibration control) und ASAC (aktiver strukturakustischer Eingriff, active structural acoustic control) zu unterscheiden. Beide verwenden im Gegensatz zu ANC (aktive Lärmkontrolle, active noise control) strukturelle statt akustischer Aktoren – bspw. Piezoaktoren statt Lautsprechern. AVC verwendet dagegen auch strukturelle Sensoren (z.B. Beschleunigungsaufnehmer), ASAC hingegen akustische Sensoren wie Mikrofone. ASAC schlägt damit die Brücke zwischen AVC und ANC [12]. Aktive Maßnahmen sind allerdings nicht Thema dieser Arbeit und werden daher nicht vertieft behandelt. Eine Übersicht zu grundlegenden Methoden wie Steuer- und Regelungsstrategien in diesem Feld gibt ELLIOTT [13].

Die passiven Maßnahmen lassen sich wiederum in Optimierungsmethoden und „direkte“ Methoden unterteilen. Während bei Optimierungsmethoden die modifizierte Endstruktur der besten Lösung einer algorithmusbasierten Iteration von Strukturänderungen entspricht [14, S. 1], fasst „direkte“ Methoden in dieser Arbeit Designmethoden zusammen, in denen die modifizierten Strukturen direkt vom Anwender erstellt werden. Die Wahl der Modifikation (Art, Form, Anzahl, Lage, ...) kann dabei auf einer Strukturanalyse basieren, was Expertenwissen voraussetzt, oder die Einflussanalyse vorgegebener Parameter zum Ziel haben. Sowohl die direkten Methoden basierend auf Expertenwissen als auch Optimierungsmethoden sind zeitaufwändig, da sie entweder ein Experimentieren erfordern [15] oder viele Iterationen an Simulationen beinhalten [16, S. 269]. Direkte Methoden, welche zu einer schnellen Lösung im Sinne von nur einer oder nur wenigen Simulationen führen, konnten in der Literatur nicht gefunden werden. Dagegen wird den Optimierungsmethoden eine Zukunft vorausgesagt, da Rechenleistung immer besser wird [15].

Eine Optimierung ist nicht Teil der Designmethode, die in dieser Arbeit verwendet werden soll, sondern es soll eine neue direkte Methode entwickelt werden, die nur wenige Simulationen benötigt. Nichtsdestotrotz sind auch bei Optimierungsmethoden zum Teil Entscheidungen zu treffen, die vergleichbar mit zu treffenden Entscheidungen in den direkten Methoden sind. Beispiele hierfür sind Vorgaben an die erlaubte Modifikation sowie die zu minimierende Zielgröße. Ebenso verfolgen beide methodischen Ansätze meistens das Ziel, eine bestehende Struktur durch Veränderungen zu verbessern und keine grundlegend neue Struktur zu entwickeln. Ein allgemeiner Überblick über Optimierungsmethoden ist in [17] zu finden. Einen ausführlichen Überblick über Optimierungsbeispiele zur passiven Schallreduktion gibt RANJBAR [18]. Eine spezifischere Zusammenfassung von Optimierungsbeispielen an dünnwandigen Strukturen zur passiven Schallreduktion, in denen ausschließlich Steifigkeitsänderungen und keine Massenänderungen in Betracht gezogen werden, ist in [14] gegeben. Aufbauend auf einem Review-Artikel [19] geben MARBURG ET AL. [16, S. 271 ff.] eine relativ aktuelle Zusammenfassung über Publikationen im Bereich der akustischen Strukturoptimierung. In beiden Quellen werden u. a. die in der Literatur zu findenden Anwendungsbeispiele als auch die dort getroffene Wahl der Designvariablen, der Randbedingungen sowie der Zielfunktionen zusammengefasst. So wird die Strukturdicke am häufigsten als Designvariable gewählt, u. a. gefolgt von Materialparametern sowie der Größe und Lage von Rippen oder Punktmassen. Als Randbedingung wird in der Regel eine Form der Massenbegrenzung gewählt, da sonst schwere und steife Strukturen die Lösungen wären. Der Schalldruck an einem Punkt oder an mehreren Punkten sowie die Schallleistung sind

am häufigsten als Zielfunktionen genannt, wenn es sich um Innenraum- bzw. Außenraumprobleme handelt [16, 19]. Auch das Schalldämmmaß (transmission loss) ist eine oft verwendete Zielgröße bei akustischen Strukturoptimierungen [16]. Neben diesen drei Größen werden auch weitere, vereinzelt genutzte Zielgrößen genannt, die allerdings mit den drei benannten gemeinsam haben, dass sie eine gekoppelte Berechnung von Struktur und Fluid erfordern. In dieser Arbeit sollen dagegen Modifikationsregeln zur Reduktion der abgestrahlten Schallleistung entwickelt werden, für die reine Strukturanalysen ausreichen, da dies den Modellierungs- und Rechenaufwand stark reduziert [20].

Sowohl in [19] als auch in [16] wird kurz erwähnt, dass in der Literatur auch Zielgrößen für Schallleistungsbewertungen zu finden sind, die auf reinen Strukturgrößen basieren. Als Beispiel dafür werden die maximierte erste Eigenfrequenz, die minimierte dynamische Nachgiebigkeit sowie die äquivalent abgestrahlte Schallleistung (ERP) genannt. Die Maximierung der ersten Eigenfrequenz folgt dem Ansatz, diese soweit zu verschieben, dass sie außerhalb des relevanten Frequenzbereichs liegt [21]. Als Resultat weist die schwingende Struktur im relevanten Bereich kein Eigenverhalten auf und es kommt dadurch zu keinen Schwingungsüberhöhungen und somit zu einer reduzierten abgestrahlten Schallleistung. Die dynamische Nachgiebigkeit als Zielgröße kann so formuliert werden, dass sie direkt das Vorhandensein von Schwingungen wiedergibt [22]. Erreicht sie einen Wert von Null, so weist die Struktur ein rein statisches Verhalten auf. Je näher das Schwingungsverhalten dem statischen Strukturverhalten kommt, desto weniger Schall wird abgestrahlt. Die ERP als Zielgröße wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts näher erläutert, da sie in dieser Arbeit eine größere Bedeutung hat.

In der Literatur werden zudem weitere Zielgrößen, die auf reinen Strukturanalysen basieren, verwendet, um die Auswirkung untersuchter Strukturänderungen auf die Schallabstrahlung zu bewerten. Einfache Ansätze betrachten die auftretenden Schwingungsamplituden und dabei insbesondere die maximal auftretenden Schwingungsgeschwindigkeiten [23]. Dabei wird davon ausgegangen, dass Strukturen mit geringeren maximalen Schwingungsamplituden auch insgesamt weniger schwingen und daher weniger Schall abstrahlen. Ein einfacher Ansatz, die Schwingungen der gesamten Struktur und nicht nur die Maximalwerte zu berücksichtigen, ist die über eine Struktur gemittelte quadratische Schwingungsgeschwindigkeit, wie sie bspw. RATLE und BERRY [24] betrachten. Dabei werden die quadratischen statt der einfachen Schwingungsgeschwindigkeiten verwendet, da die Schwingungsgeschwindigkeit eine Leistungswurzelgröße ist und daher auch quadratisch in die Berechnung der Schallleistung eingeht. RATLE und BERRY [24] verwenden allerdings zudem den Schalldruck im Fernfeld als alternative Zielgröße und vergleichen die Ergebnisse, die anhand beider Zielgrößen erreichbar sind. Sie zeigen, dass je nach Anwendungsfall die eine oder die andere Größe zu besseren Ergebnissen führt. BÖS [25, 26] verwendet den Körperschallpegel als Zielgröße in akustischen Strukturoptimierungen, der den Pegel des Produkts aus schallabstrahlender Oberfläche und mittlerer quadratischer Übertragungsadmittanz darstellt. Im Falle einer rein reellen Punktkraft entspricht die mittlere quadratische Übertragungsadmittanz der über die Oberfläche gemittelten quadratischen Schwingungsgeschwindigkeit, weswegen in diesem Fall der Körperschallpegel als die Gewichtung der mittleren quadratischen Schwingungsgeschwindigkeit mit der Strukturoberfläche angesehen werden kann. Eine weitere Erweiterung der quadratischen Schwingungsgeschwindigkeit gewichtet mit der Oberfläche als Zielgrößenformulierung verwenden ROUSOUNELOS ET AL. [27]. Sie stellen eine Berechnung im Wellenzahlbereich anhand des zweidimensionalen Wellenzahlspektrums der Schwingungsgeschwindigkeit vor, wobei sie das Ergebnis noch mit der

Impedanz der umgebenden Luft skalieren. Die Skalierung des Produkts aus gemittelter quadratischer Schwinggeschwindigkeit und Oberfläche mit der Luftimpedanz fügt der Zielgröße ein weiteres Element aus der Berechnungsgleichung der tatsächlich abgestrahlten Schallleistung hinzu. Allgemeinhin wird diese Größe auch als äquivalent abgestrahlte Schallleistung oder ERP bezeichnet.

Die ERP entspricht der Approximation der abgestrahlten Schallleistung, wobei der Abstrahlgrad auf Eins gesetzt wird [20]. Die ERP wird zunehmend als Zielgröße zur Bewertung der Auswirkung von Strukturänderungen auf die Schallabstrahlung verwendet, wie bspw. in der Forschergruppe um MARBURG [28–31] oder auch in [32, 33]. Eine der ERP ähnliche Größe wird auch von RANJBAR ET AL. [20] und MAZLOOMI ET AL. [34] als Basis ihrer Zielgröße verwendet. Da sie Untersuchungen in einem größeren Frequenzbereich durchführen, integrieren sie das Spektrum der quadratischen Schwinggeschwindigkeitspegel über den betrachteten Frequenzbereich, teilen das Ergebnis durch die Bandbreite und ziehen daraus die Wurzel. Sie nennen diese Zielgröße RMSL (effektiver Körperschallpegel, root mean square level of structure borne sound). Trotz der häufigen Verwendung der ERP als Zielgröße wird in keiner dieser Arbeiten ein Vergleich der ERP und der tatsächlich abgestrahlten Schallleistung durchgeführt, um bewerten zu können, ob Änderungen in der ERP mit Änderungen bei der tatsächlich abgestrahlten Schallleistung in die gleiche Richtung einhergehen. SERHAT und BASDOGAN [35] vergleichen dagegen die sogenannte „ERP-Intensität“ mit dem Schalldruckpegel als Zielgrößen bei einer Optimierung eines versteiften Flugzeugrumpfes aus Faserverbundwerkstoff, wobei die Schichtparameter als Designvariablen verwendet werden. Die ERP-Intensität stellt die auf die Strukturfläche bezogene ERP dar, was laut Autoren einen Vergleich von Strukturen unterschiedlicher Größe ermöglicht. Sie stellen fest, dass beide Zielgrößen eine hohe Korrelation miteinander aufweisen und zu ähnlichen Werten der Designvariablen im Optimum führen, weswegen sie die ERP-Intensität als kostengünstige Alternative zur gekoppelten vibro-akustischen Simulation empfehlen. KLAERNER ET AL. [28] vergleichen am Beispiel dünnwandiger Strukturen zudem die ERP mit der kinetischen Energie über der Frequenz und zeigen, dass beide Größen qualitativ sehr ähnliche Verläufe aufweisen, weswegen sie auch die kinetische Energie als eine geeignete Strukturgröße für eine akustische Charakterisierung von Strukturen benennen. In [31] vergleichen KLAERNER ET AL. die ERP neben der kinetischen Energie noch mit weiteren alternativen Leistungsgrößen wie z. B. der Eingangsleistung.

Es gibt weitere Ansätze für Zielgrößen basierend auf reinen Strukturanalysen, die eine bessere Approximation der tatsächlich abgestrahlten Schallleistung als die ERP versprechen. Ein Beispiel hierfür ist die sogenannte „advanced ERP“, die LUEGMAYER und MÜNCH [36] vorstellen. Dabei korrigieren sie die ERP durch die Multiplikation mit dem Abstrahlgrad eines Kolbenstrahlers, sodass die Überschätzung der Schallleistung gerade im niederfrequenten Bereich reduziert wird. Die gleiche Formulierung verwenden auch KLAERNER ET AL. [31] als eine ihrer Zielfunktionen unter dem Namen „gewichtete ERP“. Sie bewerten die advanced oder gewichtete ERP als eine zu progressive Korrektur der ERP. UNRUH ET AL. [37] sowie ROTHE und LANGER [38] bestimmen die abgestrahlte Schallleistung mittels des sogenannten Elementarstrahleransatzes (elemental radiator approach) [39]. Dabei wird die schwingende Struktur in Elementarstrahler unterteilt, die jeweils wie ein eigener Kolbenstrahler behandelt werden. Das gesamte Schallfeld setzt sich aus der Superposition der Schallfelder aller Elementarstrahler zusammen. Vorteil des Elementarstrahleransatzes ist es, dass er nur die Schallabstrahlung ins Fernfeld berücksichtigt [37]. Ein Nachteil ist allerdings, dass er nur bei ebenen Strukturen anwendbar ist [40].

Bei den passiven direkten Methoden kann – unabhängig von der gewählten Zielgröße – eine Änderung des Strukturverhaltens entweder durch die Änderung der Geometrie erfolgen, was meist mit einer Erhöhung der Steifigkeit bei konstant gehaltener Masse einhergeht, oder durch die Wegnahme oder das Hinzufügen von Material, was meist eine reine Massenänderung oder eine gleichzeitige Änderung von Masse und Steifigkeit bedeutet. Geometrieänderungen können in Form von Sicken, die in ihrer Position, Form und Größe auf einer Struktur variiert werden [41, 42], erfolgen oder indem die Verschiebung von Modellknoten erlaubt wird [20]. Solche Geometrieänderungen sind in dieser Arbeit nicht Teil des Lösungsraums und werden daher nicht näher beschrieben. Ein methodischer Ansatz, der auf einer Materialwegnahme zur Reduktion der Schallabstrahlung basiert, ist die Auslegung akustischer Schwarzer Löcher (ABH, acoustic black hole) [37]. Dabei handelt es sich um kreisrunde Bereiche auf dünnwandigen Strukturen, in denen die Strukturdicke ausgehend vom Kreisrand bis zum Kreismittelpunkt gemäß einer vorgegebenen Funktion kontinuierlich abnimmt. UNRUH ET AL. [37] untersuchen, wie sich die Lage, die Größe und die Anzahl der ABHs bei einer rechteckigen Platte auf die Schwinggeschwindigkeiten und die abgestrahlte Schalleistung auswirken. Sie zeigen u. a., dass der Einfluss der Größe eine wesentlich bedeutendere Rolle als die Lage der ABHs spielt. Allerdings wird im Rahmen dieser Arbeit eine Materialwegnahme als Teil einer möglichen Strukturmodifikation ebenfalls ausgeschlossen und dieser Ansatz somit nicht weiter verfolgt.

MCMILLAN und KEANE [43] platzieren nacheinander manuell 50 Punktmassen auf einer langen und schmalen Platte. Ihr Ziel ist es, so die Eigenfrequenzen in einem definierten Frequenzband zu verschieben und dadurch eine Schwingungsreduktion (sie nennen es Schwingungsisolierung) in diesem Frequenzband zu erzielen. Als Zielfunktion zur Platzierung der Massen verwenden sie die Schwingungsantwort – gemittelt über die diskreten Frequenzen im definierten Frequenzband – an drei Punkten, die an einem Ende der Platte liegen. Gleichzeitig wird die Platte an drei anderen Punkten am anderen Plattenende mit einem weißen Rauschen angeregt. Weiterhin begrenzen sie für ihre Methode die möglichen Positionen der Massen auf die Knotenlinien der höchsten Eigenschwingform im Frequenzband. Diese Restriktion an die Lage der Massen hat sich in ihrer ersten Untersuchung [44] als vorteilhaft erwiesen. Für alle möglichen Positionen berechnen sie anschließend die Zielfunktion und wählen dann diejenige Position für die Massenpositionierung aus, welche zum kleinsten Wert der Zielfunktion führt. Dies wiederholen sie, bis alle Massen platziert sind. Sie zeigen, dass ihre Methode, die Massen zu platzieren, genauso gut ist wie die Optimierung der Massenpositionen mittels eines genetischen Algorithmus, bei dem ebenfalls vorgegeben ist, dass alle Massen auf den Knotenlinien der höchsten betrachteten Eigenschwingform liegen müssen. Ihre Methode benötigt allerdings weniger Simulationen als der genetische Algorithmus und ist damit effizienter.

RATLE und BERRY [24] untersuchen, wie gut sich genetische Algorithmen eignen, um über die Platzierung von Punktmassen das Schwingungsverhalten von Platten zu kontrollieren. Wie bereits erwähnt, verwenden sie dabei zwei unterschiedliche Zielfunktionen – die mittlere quadratische Schwinggeschwindigkeit und den Schalldruck im Fernfeld. In einem ersten Schritt platzieren sie nur eine Masse und berechnen die mittlere quadratische Schwinggeschwindigkeit für alle möglichen Massenpositionen, die dem genetischen Algorithmus zur Verfügung stehen, und tragen die Ergebnisse über den Positionen auf, sodass eine flächige Zielgrößendarstellung entsteht. Dies machen sie für zwei unterschiedliche Frequenzbänder, wobei die mittlere quadratische Schwinggeschwindigkeit über die

Frequenzen gemittelt wird. Sie treffen die Aussage, dass die optimale Massenposition eine Funktion des Anregungsortes sowie der maximalen Verschiebung ist, da im ersten Frequenzband das Optimum im Bereich der maximalen Verschiebung der dominanten Schwingform liegt und im zweiten Frequenzband das Optimum nahe der Kraftanregung liegt. Weitere Analysen der flächigen Zielgrößendarstellungen, um genauere Zusammenhänge zwischen ihrem Verlauf und dem Strukturverhalten zu identifizieren, werden nicht durchgeführt. Die Zielgrößendarstellungen in dem Beitrag haben den Sinn, Kenntnis über das Zielgrößenverhalten zu erlangen, um so die Ergebnisse des genetischen Algorithmus besser bewerten zu können. In einem zweiten Schritt positionieren sie nacheinander für beide Zielgrößen fünf Massen mittels des genetischen Algorithmus auf der Platte. Sie vergleichen die optimalen Lösungen zudem mit erzielbaren Lösungen, wenn alle Massen am Ort der Kraftanregung positioniert werden, und zeigen, dass für beide Zielgrößen höhere Reduktionen erzielt werden können, wenn die Massen nicht am Kraftangriffspunkt liegen. Die Wirkungsweise aller optimalen Lösungen ist, dass sie eine Verschiebung der Eigenfrequenzen aus dem betrachteten Frequenzband heraus verursachen. In dieser Arbeit sollen allerdings Lösungen gefunden werden, die nicht auf einer Verschiebung von Eigenfrequenzen basieren.

Direkte Methoden, in denen Massen anhand einer Strukturanalyse oder zur Einflussanalyse direkt platziert werden, sind im Vergleich zu Optimierungsmethoden selten zu finden. Beispiele für direkte Massenplatzierungen mit dem Ziel einer Einflussanalyse sind in [45, 46] beschrieben. ZHANG ET AL. [45] untersuchen den Einfluss von Punktmassen bei dünnwandigen Platten auf das Schwingungs- und Abstrahlverhalten. Insgesamt untersuchen sie die Auswirkung von drei unterschiedlich schweren Massen bei drei unterschiedlichen Positionen. Dabei vergleichen sie u. a. die Unterschiede des Masseneinflusses bei niedrigen und hohen Frequenzen. Sie stellen fest, dass eine Punktmasse die Schwingung und Abstrahlung nahe der ersten Eigenfrequenz gut senken kann, während sie bei höheren Frequenzen dagegen sogar zu einem nicht unerheblichen Anstieg beider Größen führen kann. Eine Bewertung, welche Position oder welche Masse für eine Reduktion der Abstrahlung in Abhängigkeit von der Frequenz gewählt werden sollte, erfolgt allerdings nicht. LI und LI [46] untersuchen den Einfluss unterschiedlicher Massenverteilungen auf das Abstrahlverhalten einer Platte. Insgesamt untersuchen sie vier Varianten, wobei sich die Massen in ihrem Gewicht, in ihrer Position oder in der Größe ihrer flächigen Ausdehnung unterscheiden. Sie stellen fest, dass der resultierende Effekt auf die Schallleistung größer ist, wenn die Masse auf einem Schwingungsbauch liegt oder wenn sie konzentrierter aufgebracht ist. Allerdings muss dieser Effekt in Resonanzfrequenzen keine Reduktion der Schallleistung sein, sondern kann auch einen Anstieg bedeuten. Auch in diesem Beitrag wird keine Empfehlung für eine Platzierung von Massen mit dem Ziel einer Reduktion der Schallleistung abgeleitet.

Beispiele für Massenplatzierungen anhand einer Strukturanalyse sind in [23] und [47] zu finden. Beide Forschungsarbeiten haben gemeinsam, dass sie die Strukturintensität (STI) als Analysegröße verwenden. HERING [23] beschreibt, wie anhand einer STI-Analyse Strukturänderungen platziert werden können, um eine Schwingungsreduktion zu erreichen. Dabei betrachtet er sowohl die gesamte STI als auch einzelne Anteile der STI, welche der Energie unterschiedlicher Wellenformen zugeordnet werden können. Konkret unterscheidet er den In-plane- und den Out-of-plane-Anteil. Beide unterscheiden sich durch die Schwingungsrichtung der Wellen – in der Plattenebene bzw. senkrecht zur Plattenebe-

ne. HERING zeigt, dass der In-plane-Anteil der STI mit zunehmender Krümmung einer Struktur für den Energietransport in einer Struktur verantwortlich ist [23, S. 80 ff.]. An zwei unterschiedlichen Strukturen, einer Ölwanne [23, S. 92 ff.] und einem Gepäckraumboden [23, S. 102 ff.], analysiert er anschließend die STI und untersucht separat den Massen- und den Steifigkeitseinfluss durch die Applikation von Punktmassen bzw. diskreten Federn auf ausgeprägten Energiepfaden. Den Federn weist HERING lediglich eine Steifigkeit in der Strukturebene zu, da seine STI-Analyse ergibt, dass der In-plane-Anteil in beiden Modellen die Energiepfade am Modifikationsort dominiert. Er zeigt, dass sowohl die Massen- als auch die Steifigkeitserhöhung das gesamte Energieniveau sowie die Amplituden der Schwinggeschwindigkeiten in den Strukturen in der betrachteten Anregungsmode senken.

STOEWER [47] untersucht zum einen den Einfluss von Strukturänderungen an verschiedenen dünnwandigen Strukturen auf die STI und die Schwinggeschwindigkeitsverteilung [47, S. 81 ff.] und zum anderen platziert er anhand der STI-Analyse gezielt Strukturmodifikationen mit dem Ziel einer reduzierten Schwinggeschwindigkeitsverteilung [47, S. 59 ff.]. Er stellt das Beispiel eines Wagenbodenblechs vor, das auf der einen Seite des Mitteltunnels angeregt wird und bei dem sich auf der anderen Seite des Mitteltunnels die zu mindernde Schwingform ausprägt. Auf dem Wagenbodenblech platziert er u. a. ein Verstärkungsblech an der Stelle, wo der maßgebliche Energietransport über den Mitteltunnel beginnt, was anhand der verhältnismäßig hohen Flussdichtewerte der STI an dieser Stelle erkennbar ist. Er zeigt, dass durch diese verhältnismäßig kleine Änderung die Schwingungsamplitude mehr als halbiert werden kann. Somit bestätigt er die Ergebnisse von HERING [23].

Der Ansatz der STI-Analyse wird von ROTHE und LANGER [38] für die akustische Strukturoptimierung aufgegriffen. Sie platzieren allerdings keine Massen anhand der STI, sondern nutzen die Flussdichte der STI im Rahmen einer Topologieoptimierung als Kriterium für die Dickenänderung der einzelnen Elemente (Voxel) einer Platte. Dabei vergleichen sie zwei Methoden, mit denen basierend auf der STI entschieden wird, ob ein Voxel in seiner Dicke erhöht oder reduziert wird oder ob keinerlei Änderung erfolgt. Beide Methoden haben gemeinsam, dass die Dicke mit zunehmender Flussdichte tendenziell ansteigt und dass die Gesamtmasse der Platte nicht ansteigen, aber sinken darf. Da es sich um eine Topologieoptimierung mit einer Iteration handelt, kann im Sinne dieser Arbeit auch von einer direkten Methode zur Strukturänderung gesprochen werden. Mit beiden Selektionsvarianten können ROTHE und LANGER im betrachteten Frequenzbereich eine Reduktion der Schallleistung gegenüber dem Ausgangszustand erreichen. Sie zeigen zudem, dass die Flussdichteverteilung der STI in der optimierten Platte anhand der Variante, die eine höhere Reduktion der Schallleistung erzielt hat, im Vergleich zur Ausgangsplatte deutlich homogener ist.

Zuletzt sei auf die Arbeit von CUNEFARE und KOOPMANN [48] verwiesen, die sich zwar nicht mit der Auswirkung von Strukturänderungen auf die Schallabstrahlung beschäftigen, aber eine Analyse der „akustischen Designsensitivität“ (ADS) vorstellen. Sie leiten dafür eine Gleichung ab, mit der sie für eine dünnwandige Box und einen dünnwandigen Zylinder den Zusammenhang zwischen der abgestrahlten Schallleistung und der Schwinggeschwindigkeit in Normalenrichtung beschreiben können. Anschließend ändern sie für jedes Element der untersuchten Strukturen die Schwinggeschwindigkeit und bestimmen so die resultierende Änderung in der Schallleistung. Das Verhältnis der Änderungen plotten sie als ADS über den Strukturen. Orte mit einer hohen ADS sind aus ihrer Sicht geeignete Positionen für den aktiven Eingriff zur Schallminderung. Weiterhin kann die Analyse der ADS im De-

signprozess hilfreich sein, um aufzuzeigen, wo es zu einer Minderung der Schwinggeschwindigkeit aufgrund einer Strukturänderung kommen sollte. Die ADS gibt allerdings keine Auskunft darüber, wie eine solche Strukturänderung aussehen sollte und wo sie platziert werden sollte. An dieser Stelle greift inhaltlich die vorliegende Dissertation an.

1.3 Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Die bereits motivierte Zielstellung dieser Arbeit lautet, Modifikationsregeln zu entwickeln, die zur Bewältigung von Akustikproblemen bei dünnwandigen Strukturen aufzeigen, an welchen Positionen „kleine“ Massen- und/oder Steifigkeitserhöhungen zu einer deutlich verminderten Schallabstrahlung führen. Die Untersuchungen zur Entwicklung der Modifikationsregeln werden mittels Finite-Elemente (FE)-Analysen durchgeführt. Um die Aufgabe zu konkretisieren und Unterschiede zu beschriebenen Ansätzen aus der Literatur aufzuzeigen, werden zunächst Anforderungen an die Modifikationsregeln, die resultierenden modifizierten Strukturen sowie die Modifikationen selbst definiert. Anschließend wird beschrieben, wie die Aufgabe gelöst und somit die Zielstellung erreicht werden soll.

Die Modifikationsregeln sollen es Anwendern ermöglichen, Strukturen so modifizieren zu können, dass die Schallabstrahlung sinkt, ohne selbst Expertenwissen mitbringen und das Strukturverhalten analysieren zu müssen, um Modifikationspositionen zu identifizieren, wie es bspw. HERING [23, S. 92 ff.] macht. Die Lokalisierung der Modifikationspositionen soll das Resultat der angewendeten Modifikationsregeln sein. Demnach sollen die Modifikationsregeln die Analyse des Strukturverhaltens übernehmen, was auch eine automatisierte, rechnergestützte Auswertung ermöglicht. Eine ebenfalls zu treffende Vorgabe ist der Frequenzbereich, in welchem die Modifikationsregeln zu einer Reduktion der Schallabstrahlung führen sollen. Im Stand der Forschung sind Ansätze beschrieben, die sowohl für eine einzelne Frequenz [23, 47] als auch für einen größeren Frequenzbereich [24, 38, 43] zu einer Verbesserung führen. Im Rahmen dieser Arbeit sollen Strukturen ausschließlich für einzelne Frequenzen verbessert werden. Da es um die Entwicklung neuartiger Regeln zur Strukturmodifikation geht, ist es sinnvoll, sich der Problemlösung Schritt für Schritt zu nähern. Eine monofrequente Lösung zu entwickeln, stellt einen Schritt vor der Entwicklung einer multifrequenten Lösung dar, da weniger Informationen berücksichtigt werden müssen. Weiterhin sollen die Modifikationsregeln für reine Strukturmodelle gültig sein und keine numerischen Luftschallmodellierungen benötigen, um den Rechenaufwand gering zu halten. Es soll an dieser Stelle auch noch einmal betont werden, dass der anwendungsorientierte Fokus der zu entwickelnden Modifikationsregeln auf der Verbesserung bestehender dünnwandiger Strukturen im fortgeschrittenen Entwicklungsprozess liegt und nicht auf der Unterstützung einer guten Auslegung neuer Strukturen. Der Unterschied, der sich durch diese Vorgabe ergibt, liegt im möglichen Lösungsraum, da bei einer Neuauslegung in der Regel keine oder zumindest weniger Vorgaben für ein konkretes Geometriedesign bestehen.

Die Modifikationen sollen die Strukturen in ihrer Geometrie und in ihren Struktureigenschaften nur geringfügig verändern – abgesehen von einer großen Reduktion der Schallabstrahlung. Die Erfüllung dieser Anforderung soll anhand der Lage der Eigenfrequenzen überprüft werden, welche sich im Gegensatz zu den Arbeiten von MCMILLAN und KEANE [43] sowie RATLE und BERRY [24] nicht stark verändern sollen. Hierbei geht es um die Lage aller Eigenfrequenzen einer modifizierten Struktur und nicht nur die Lage der Eigenfrequenz, für welche die monofrequente Lösung ausgelegt wird. Der

Grund für diese Anforderung ist, dass es im Anwendungsszenario einer monofrequenten Problemstellung durch die Modifikation nicht dazu kommen soll, dass andere Eigenfrequenzen soweit verschoben werden, dass sie in kritische Bereiche wandern und dadurch bedingt neue Probleme entstehen. Um die Strukturmodifikationen „klein“ zu halten, sollen die modifizierten Strukturen die gleiche dünnwandige Grundgeometrie wie das Basismodell aufweisen und nur in lokal begrenzten Bereichen höhere Dicken besitzen dürfen.

Die Modifikationen sollen demnach Material hinzufügen und nicht entfernen, wie es bspw. durch das Hinzufügen von ABHs möglich wäre, was bspw. UNRUH ET AL. [37] gezeigt haben. Auch eine Materialwegnahme durch die Erzeugung von Löchern ist im Rahmen dieser Arbeit nicht Teil des Lösungsraumes, da die Basisstruktur unverändert bestehen bleiben soll. Diese Forderung wird aufgrund der im fortgeschrittenen Entwicklungsprozess bereits bestehenden Abhängigkeiten zwischen der Geometrie und Anforderungen aus anderen Bereiche als der Akustik, wie bspw. dem Design oder der Betriebsfestigkeit, gestellt. Ferner soll durch die Modifikationen die Dämpfung in der Struktur nicht erhöht werden, um den reinen Massen- und/oder Steifigkeitseinfluss untersuchen zu können. Die numerische Umsetzung der Strukturmodifikationen sollte skriptbasiert möglich sein, sodass der gesamte Ablauf der Strukturmodifikation zur Reduktion der Schallabstrahlung von der Analyse des Basismodells durch die Anwendung der Modifikationsregel bis hin zum Modellaufbau der neuen Struktur automatisierbar ist.

In dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche, sehr vielversprechende Vorgehensweisen angewandt, um direkte Designmethoden für die beschriebene Zielstellung zu entwickeln. Bei diesen beiden Vorgehensweisen handelt es sich um

1. die Entwicklung von Modifikationsregeln anhand der Strukturintensität und
2. die Entwicklung von Modifikationsregeln anhand einer systematischen Strukturanalyse.

In beiden Ansätzen wird die ERP (siehe Gleichung (2.15)) als Kenngröße für die Schallabstrahlung verwendet. Damit kann die Anforderung erfüllt werden, dass reine Strukturanalysen zur Zielgrößenbestimmung ausreichend sind und keine Luftschallberechnungen durchgeführt werden müssen. Obwohl auch in anderen Forschungsarbeiten [28–33] die ERP als ersatzweise Bewertungsgröße für die tatsächlich abgestrahlte Schallleistung verwendet wird, soll die Gültigkeit dieser Vereinfachung für die in dieser Arbeit getätigten Aussagen gezeigt werden. Anhand der ERP sollen modifizierte Strukturen miteinander verglichen werden. Es geht somit darum, zu bewerten, ob eine Struktur lauter als eine andere ist und nicht darum, wie laut beide Strukturen absolut gesehen sind. Dafür reicht es aus, wenn sich ERP und tatsächlich abgestrahlte Schallleistung aufgrund einer Strukturmodifikation in die gleiche Richtung ändern (absinken oder ansteigen). Zur Überprüfung einer gleichen Änderungstendenz beider Größen aufgrund von Strukturmodifikationen werden numerische Untersuchungen durchgeführt.

Die beschriebenen Forschungsarbeiten [23, 38, 47], welche die Analyse der STI als Ausgangspunkt für schallmindernde Strukturänderungen nutzen, weisen Ergebnisse auf, die zu verbesserten Strukturen geführt haben. Diese Ergebnisse zeigen, dass die STI-Analyse ein großes Potenzial für die lärmarme Konstruktion aufweist, weswegen der STI-Ansatz in dieser Arbeit weiterverfolgt wird. In einem ersten Schritt werden die STI-Vektorfelder verschiedener, unterschiedlich modifizierter Strukturen bestimmt

und charakterisiert. Für einen Vergleich und eine Bewertung der Vektorfelder ist es notwendig, die Informationsdichte zu reduzieren und Vergleichs- bzw. Bewertungsgrößen zu definieren. Dafür werden STI-basierte skalare Kenngrößen aufgestellt, für die verschiedenen Strukturen berechnet und analysiert. Neben einem Vergleich der Kenngrößen miteinander werden die STI-basierten Kenngrößen mit der ERP korreliert. Ziel dieser Korrelationsanalyse ist es, Zusammenhänge zwischen der STI in einer Struktur und der resultierenden Schallabstrahlung dieser Struktur zu identifizieren, um daraus Modifikationsregeln ableiten zu können. Mittels der gefundenen Zusammenhänge zwischen STI und ERP wird unter Einbeziehung der Ergebnisse der beschriebenen, vorangegangenen Forschungsarbeiten eine Hypothese für eine Modifikationsregel aufgestellt und getestet. Die Hypothesenuntersuchung erfolgt dabei an zwei unterschiedlichen Strukturen – zum einen am Basismodell der Platte und zum anderen am komplexeren Basismodell des Gepäckraumbodens.

Der zweite Ansatz zur Entwicklung von Modifikationsregeln ist die systematische Strukturanalyse. Mit der systematischen Strukturanalyse sollen Zusammenhänge zwischen der Position einer Modifikation, welche die Masse und/oder Steifigkeit erhöht, und der resultierenden Schallabstrahlung der Struktur gefunden werden. Hintergrund ist die Frage, ob es zwischen den Strukturgrößen, die an der Modifikationsposition auftreten, und der resultierenden Schallabstrahlung ähnliche Zusammenhänge gibt, wie sie im Falle einer Dämpfungserhöhung zwischen der Dehnungsenergie und der Schallabstrahlung existieren. In der Literatur konnte keine Untersuchung gefunden werden, die sich mit einer systematischen Analyse von Massen- und Steifigkeitserhöhungen sowie ihrer Wirkung auf die Schallabstrahlung beschäftigt. RATLE und BERRY [24] zeigen allerdings durch die Darstellung ihrer Zielfunktion über den möglichen Massenpositionen in der Optimierung einer Platte, dass Zusammenhänge zwischen Modifikationsposition und Strukturgrößen zu erwarten sind, weswegen detailliertere Analysen vielversprechend erscheinen.

Für die systematische Strukturanalyse wird in dieser Arbeit zunächst eine lokal begrenzte Modifikation schrittweise in ihrer Position auf den beiden Basismodellen (Platte und Gepäckraumboden) variiert und jeweils die resultierende ERP als Bewertungsgröße für die Schallabstrahlung bestimmt. Damit besitzt die Vorgehensweise Parallelen zur beschriebenen Arbeit von CUNEFARE und KOOPMANN [48], die schrittweise den Einfluss einer Geschwindigkeitsänderung auf die Schallleistung untersucht haben. Anschließend werden die ERP-Werte aller Modelle in sogenannten ERP-Skalarfeldern zusammengetragen, um die Zusammenhänge zwischen den Modifikationspositionen und der ERP zu visualisieren. Darauf aufbauend wird untersucht, ob diese ERP-Skalarfelder auch für andere, großflächigere Modifikationen einen gültigen Zusammenhang zwischen Strukturbereich und Auswirkung einer Massen- und/oder Steifigkeitserhöhung an dieser Stelle auf die Schallabstrahlung besitzen. Dafür werden die ERP-Skalarfelder als „Landkarten“ zur Positionierung von Modifikationen verwendet. Sowohl in den Minima- als auch Maxima-Bereichen werden Modifikationen platziert, um zu überprüfen, ob sich die Schallabstrahlung dadurch gezielt absenken oder erhöhen lässt. Dieser Analyseschritt ist relevant, da die Modifikationen im Rahmen der systematischen Strukturanalyse zur Erzeugung der ERP-Skalarfelder lokal begrenzt sind und daher aufgrund ihrer sehr geringen Masse und Steifigkeit nur sehr geringfügige ERP-Änderungen hervorrufen. Für praxisrelevante Verbesserungen einer Struktur sind höhere ERP-Änderungen nötig, was schwerere und damit großflächigere Modifikationen erfordert. Ein weiterer wichtiger Schritt, um basierend auf der systematischen Strukturanalyse

se Modifikationsregeln abzuleiten, ist es, Zusammenhänge zwischen den ERP-Skalarfeldern und den Strukturgrößen der Basismodelle, wie bspw. den Schwinggeschwindigkeiten, zu identifizieren. Solche Zusammenhänge erlauben es, die ERP-Skalarfelder nicht aufwändig bestimmen zu müssen, sondern sie direkt aus den Strukturgrößen der Basismodelle vorhersagen zu können. In dieser Arbeit werden dafür Approximationsansätze basierend auf einer multiplen linearen Regression untersucht. Aus den Approximationslösungen werden anschließend konkrete Modifikationsregeln abgeleitet und sowohl numerisch als auch experimentell validiert.

Diese Arbeit gliedert sich wie folgt: Zunächst werden in Kapitel 2 die relevanten Grundlagen zum Verständnis der Arbeit beschrieben. Darin wird auf die STI, die ERP und allgemeine Prinzipien zur Schallreduktion eingegangen. In Kapitel 3 werden anschließend die Analysemethoden sowie die untersuchten numerischen Modelle und das experimentelle Modell vorgestellt. Bei der Modellvorstellung wird nicht nur auf die Geometrie und die numerische oder experimentelle Umsetzung der Modellierung eingegangen, sondern es wird auch das Strukturverhalten dieser Modelle charakterisiert. Ziel ist es, damit eine Vergleichsbasis für die Bewertung der Strukturmodifikationen zu schaffen, aber auch anderen Forschern die Möglichkeit zu bieten, die Modelle als Benchmark verwenden oder eigene Schlüsse ziehen zu können. Kapitel 3 umfasst ebenfalls die Voruntersuchung zur Eignung der ERP als Bewertungsgröße qualitativer Änderungen der Schallabstrahlung aufgrund von Strukturmodifikationen. Die beiden Ansätze zur Entwicklung von Modifikationsregeln und damit zur Entwicklung neuer direkter Designmethoden sowie die zugehörigen Ergebnisse werden in den Kapiteln 4 und 5 beschrieben. Dabei enthält Kapitel 4 den Ansatz basierend auf der STI und Kapitel 5 den Ansatz basierend auf der systematischen Strukturanalyse. Zum Abschluss werden in Kapitel 6 eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

2 Grundlagen

Ein Ansatz dieser Arbeit zur Entwicklung der in Kapitel 1 beschriebenen Modifikationsregeln beruht auf der Strukturintensität (STI). Daher wird zunächst die Berechnung der STI vorgestellt. Des Weiteren ist es das Ziel dieser Arbeit, mittels der Modifikationsregeln eine Reduktion der Schallabstrahlung zu erreichen. Für die Bewertung der Schallabstrahlung einer Struktur wird üblicherweise als Kenngröße die Schallleistung verwendet, da sie die abgestrahlte Energie einer Struktur unabhängig von der Rückkopplung des Schallfeldes beinhaltet [49, S. 349]. Die Berechnungsvorschrift der Schallleistung sowie die Herleitung der äquivalent abgestrahlten Schallleistung (ERP) werden anschließend beschrieben. Zum einen wird die ERP in dieser Arbeit ersatzweise für die tatsächlich abgestrahlte Schallleistung verwendet und zum anderen basiert auf ihr der zweite verwendete Ansatz zur Entwicklung der Modifikationsregeln. Um die Schallabstrahlung zu reduzieren, werden in dieser Arbeit Strukturen modifiziert. Es wird abschließend aufgezeigt, welche prinzipiellen Ansatzpunkte dafür zur Auswahl stehen.

2.1 Bestimmung der Strukturintensität in dünnwandigen Strukturen

Die STI beschreibt den Energiefluss des Körperschalls in schwingenden Strukturen. Mit der STI kann somit die Energieausbreitung in Festkörpern ausgehend von einer oder mehreren Energiequelle(n) hin zu einer oder mehreren Energiesenke(n) charakterisiert werden. Energiequellen können bspw. anregende Kräfte sein. Energiesenken liegen aufgrund der Materialdämpfung naturgemäß – global verteilt – in jeder Struktur vor. Die STI \vec{I}_S ist ein Vektorfeld, das sich im Zeitbereich durch das negative Produkt aus dem Spannungstensor \mathbf{S} und dem Vektor der Schwinggeschwindigkeit \vec{v} ergibt

$$\vec{I}_S(t) = -\mathbf{S}(t) \cdot \vec{v}(t) \Rightarrow \begin{bmatrix} I_{S,x} \\ I_{S,y} \\ I_{S,z} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sigma_{xx}(t)v_x + \tau_{xy}v_y + \tau_{xz}v_z \\ \tau_{yx}(t)v_x + \sigma_{yy}v_y + \tau_{yz}v_z \\ \tau_{zx}(t)v_x + \tau_{zy}v_y + \sigma_{zz}v_z \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Darin entsprechen zum einen x, y, z den Koordinatenrichtungen und zum anderen σ und τ den einzelnen Normal- bzw. Schubspannungskomponenten. Das negative Vorzeichen ist durch die Vorzeichenkonvention der Mechanik bedingt: Negative Druckspannungen und -kräfte werden mit einem negativen Vorzeichen versehen [23, S. 27]. Die STI in einem Festkörper ist das Äquivalent zur Schallintensität \vec{I} in einem Fluid

$$\vec{I}(t) = -p(t) \cdot \vec{v}_p(t), \quad (2.2)$$

welche sich aus dem Schalldruck p und der Schallschnelle \vec{v}_p der Luftpartikel bestimmt. In der Maschinenakustik ist auch der Energiefluss des Körperschalls bei einer harmonischen Anregung im Frequenz- statt Zeitbereich von Interesse. Im Frequenzbereich ist die STI

$$\underline{\vec{I}}_S(f) = -\frac{1}{2} \cdot \underline{\mathbf{S}}(f) \cdot \underline{\vec{v}}^*(f) \quad (2.3)$$

eine komplexe Größe, was durch den Unterstrich gekennzeichnet wird. Das Asterisk * markiert konjugiert komplexe Größen. Lediglich der Realteil der STI, auch aktive STI $\vec{I}_{S,a}(f)$ genannt, entspricht dem Energiefluss. Der Imaginärteil der STI, der reaktive STI $\vec{I}_{S,r}(f)$ genannt wird, spielt bezüglich der Energieausbreitung in einer Struktur keine Rolle und wird in dieser Arbeit daher nicht weiter be-

trachtet. Der Zusammenhang zwischen der STI im Zeit- und im Frequenzbereich ist für harmonische Signale durch

$$\begin{aligned}
 \langle \vec{I}_S(t) \rangle &= \text{Re} \{ -G_{S\nu}(f) \} \\
 &= \text{Re} \{ -\underline{S}_{\text{RMS}}(f) \cdot \underline{\nu}_{\text{RMS}}^*(f) \} = \text{Re} \left\{ \frac{1}{2} (-\underline{S}(f) \cdot \underline{\nu}^*(f)) \right\} \\
 &= \text{Re} \{ \vec{I}_S(f) \} = \vec{I}_{S,a}(f)
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

gegeben [50]. Darin entspricht $G_{S\nu}(f)$ dem einseitigen Kreuzleistungsdichtespektrum der komplexen Spannung und der konjugiert komplexen Schwinggeschwindigkeit. Der Faktor 1/2 resultiert aus der Verwendung von Spitzenwerten anstelle von Effektivwerten (Index RMS). Der Zusammenhang zwischen der STI im Zeit- und Frequenzbereich in Gleichung (2.4) macht deutlich, dass der Energiefluss im eingeschwungenen Zustand und damit die aktive STI dem Mittelwert der STI im Zeitbereich entspricht. Für multifrequente Signale lautet der Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzbereich [50]

$$\langle \vec{I}_S(t) \rangle = \int_f \vec{I}_{S,a}(f) \, df. \tag{2.5}$$

Setzt sich das multifrequente Signal aus N diskreten harmonischen Schwingungen zusammen, so lässt sich die multifrequente aktive STI durch die Superposition der N harmonischen Einzellösungen bestimmen [51, S. 40 f.]

$$\langle \vec{I}_S(t) \rangle = \sum_{i=1}^N \vec{I}_{S,a}(f_i). \tag{2.6}$$

Eine numerische Validierung der Superposition der STI gemäß Gleichung (2.6) haben EBERT ET AL. [52, 53] am Beispiel einer Platte durchgeführt.

In dieser Arbeit werden dünnwandige Strukturen (Schalen) betrachtet. Schalen zeichnen sich dadurch aus, dass die Verschiebung in Dickenrichtung konstant ist und lediglich Verschiebungen der Schalenmittelebene sowie Rotationsbewegungen der Schalenmittelebene auftreten [54, S. 120]. Für die STI bedeutet das, dass ein Energiefluss in Dickenrichtung vernachlässigt werden kann und sich das dreidimensionale Vektorfeld auf ein zweidimensionales, in der Schalenmittelebene liegendes reduziert. Für die STI in Schalen $\vec{I}_{S'}$, verringert sich aufgrund der geringeren Dimension auch die Dimension der Einheit von W/m^2 auf W/m . In mehreren Umformungsschritten, die HERING [23, S. 30 ff.] ausführlich beschreibt, resultiert aus Gleichung (2.3) die Berechnungsvorschrift

$$\vec{I}_{S'} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{S',x} \\ \underline{I}_{S',y} \end{bmatrix} = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \underline{N}_x \underline{\nu}_x^* + \underline{N}_{xy} \underline{\nu}_y^* + \underline{M}_x \underline{\dot{\varphi}}_y^* - \underline{M}_{xy} \underline{\dot{\varphi}}_x^* + \underline{Q}_x \underline{\nu}_z^* \\ \underline{N}_y \underline{\nu}_y^* + \underline{N}_{yx} \underline{\nu}_x^* - \underline{M}_y \underline{\dot{\varphi}}_x^* + \underline{M}_{yx} \underline{\dot{\varphi}}_y^* + \underline{Q}_y \underline{\nu}_z^* \end{bmatrix}. \tag{2.7}$$

Demnach lässt sich die STI dünnwandiger Strukturen im Frequenzbereich durch die Superposition konjugiert komplexer Produkte aus Schnittkräften \underline{N}_i , \underline{Q}_i und translatorischen Schwinggeschwindigkeiten $\underline{\nu}_i$ sowie Schnittmomenten \underline{M}_i und rotatorischen Schwinggeschwindigkeiten $\underline{\dot{\varphi}}_i$ bestimmen [55]. Die Größen aus Gleichung (2.7) sind dabei gemäß Abbildung 2.1 positiv definiert.

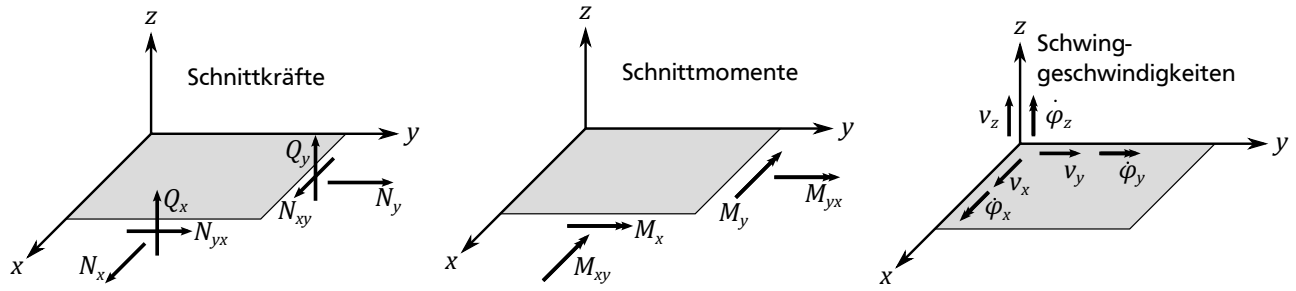


Abbildung 2.1: Definition der Schnittkräfte und -momente sowie der rotatorischen und translatorischen Schwinggeschwindigkeiten

Die Drehrichtungen des Biegemoments M_y und des Torsionsmoments M_{xy} sind positiv entgegen dem Uhrzeigersinn definiert, was der Vorzeichenkonvention in FE-Programmen entspricht. Diese Definition hängt mit der Definition der beiden Rotationswinkel φ_x und φ_y zusammen, welche positiv in Drehrichtung im Uhrzeigersinn sind. Das führt dazu, dass der Rotationswinkel φ_y der negativen Ableitung der Verschiebung u_z nach x entspricht, wohingegen der Rotationswinkel φ_x der positiven Ableitung der Verschiebung u_z nach y entspricht [56, S. 65 f.], [57, S. 6]. Durch die Vorzeichenkonvention der Schnittmomente gemäß Abbildung 2.1 entsprechen am Ende alle Produkte aus Schnittmomenten und Rotationswinkeln positiven Kräften.

Die Darstellung des Vektorfeldes der STI erfolgt in dieser Arbeit über die Energiemenge und -richtung. Die Energiemenge, auch Flussdichte FD genannt, entspricht dem Betrag der STI

$$FD = |\vec{I}_{S',a}|. \quad (2.8)$$

In Abbildung 2.2 ist die Darstellung des Vektorfeldes STI am Beispiel des STI-Verlaufs in einer Rechteckplatte zu sehen. Der farbliche Verlauf entspricht der Flussdichte in logarithmischer Skalierung und die Pfeile geben die auf die Vektorlänge normierte Richtung an.

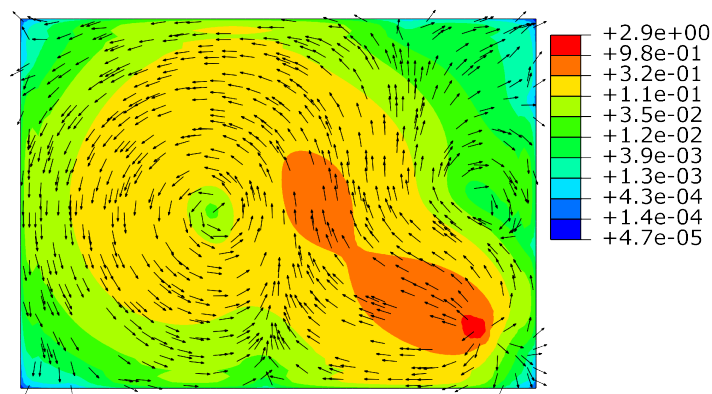


Abbildung 2.2: beispielhafte Darstellung der Strukturintensität in einer Platte

2.2 Bestimmung der Schallabstrahlung

Die Schallabstrahlung einer Struktur wird, wie bereits erwähnt, üblicherweise durch die Schallleistung bewertet. Denn die Schallleistung stellt eine Kenngröße dar, welche die abgestrahlte Energie einer Struktur unabhängig von der Rückkopplung des Schallfeldes beschreibt [49, S. 349].

Die Schallleistung P einer Struktur im eingeschwungenen Zustand kann durch die Integration der Schallintensität $\vec{I}(f)$ über eine die Struktur umhüllende Oberfläche S bestimmt werden [58, S. 63]

$$P(f) = \int \vec{I}(f) \cdot \vec{n} \, dS = \int I_n(f) \, dS. \quad (2.9)$$

Die Multiplikation der Schallintensität $\vec{I}(f)$ mit dem Normalenvektor \vec{n} bewirkt, dass nur der Intensitätsanteil senkrecht zur Oberfläche berücksichtigt wird ($I_n = \vec{I} \cdot \vec{n}$). Das Ersetzen der Schallintensität durch das Produkt aus Schalldruck und Schallschnelle gemäß Gleichung (2.2) bei gleichzeitiger Überführung der Beziehung analog zu Gleichung (2.4) in den Frequenzbereich führt zu

$$P(f) = \frac{1}{2} \int \operatorname{Re} \{ \underline{p}(f) \underline{v}_p^*(f) \} \cdot \vec{n} \, dS = \frac{1}{2} \int \operatorname{Re} \{ \underline{p}(f) \underline{v}_{p,n}^*(f) \} \, dS. \quad (2.10)$$

Eine andere Darstellung der Schalleistung $P(f)$, die von einer schwingenden Struktur abgestrahlt wird, ist durch die maschinenakustische Grundgleichung [59, S. 171], [1, S. 131] gegeben

$$P(f) = \frac{1}{2} \rho c S \sigma(f) \operatorname{Re} \{ \overline{\underline{v}_n(f) \underline{v}_n^*(f)} \} = \frac{1}{2} \rho c S \sigma(f) \overline{\underline{v}_n^2(f)}. \quad (2.11)$$

Darin entspricht ρ der Dichte des umgebenden Mediums, c der Schallgeschwindigkeit und $\sigma(f)$ dem Abstrahlgrad. Der Index n bei der Schwinggeschwindigkeit v gibt an, dass es sich um den Geschwindigkeitsanteil normal zur schallabstrahlenden Oberfläche S handelt. Zudem ist die Schwinggeschwindigkeit räumlich über die Strukturoberfläche zu mitteln, was durch den Oberstrich symbolisiert wird.

Ist es nun das Ziel, die Schallabstrahlung $P(f)$ anhand einer der drei Gleichungen (2.9)–(2.11) mittels eines FE-Programms zu bestimmen, so muss bei der Berechnung auch das umgebende Medium berücksichtigt werden, da alle drei Gleichungen Größen enthalten (in Gl. (2.9): \vec{I} , in Gl. (2.10): \underline{p} und \underline{v}_p bzw. in Gl. (2.11): σ), die nicht über eine reine Strukturberechnung bestimmt werden können. Eine rechnerische Berücksichtigung des umgebenden Mediums – sei es durch eine gekoppelte Fluid-Strukturberechnung oder „nur“ durch eine sequenzielle Berechnung von Struktur und Fluid ohne Berücksichtigung der Rückkopplung des Fluids auf die Struktur – führt zu einem deutlich höheren Berechnungsaufwand im Vergleich zu einer reinen Strukturberechnung. Aus diesem Grund werden vereinfachende Annahmen zur Bestimmung der Schalleistung getroffen, durch die es möglich wird, auf Fluidberechnungen zu verzichten.

Eine häufige Vereinfachung zur Beschreibung des lokalen Zusammenhangs zwischen dem Schalldruck $\underline{p}(f)$ und der Schallschnelle $\underline{v}_{p,n}(f)$ lautet [31, 60]

$$\underline{p}(f) \approx \rho c \underline{v}_{p,n}(f). \quad (2.12)$$

Im Fernfeld geht Gl. 2.12 über in $\underline{p}(f) = \rho c \underline{v}_{p,n}(f)$. Werden weiterhin lokale akustische Effekte, wie der akustische Kurzschluss (siehe [59, S. 75 ff.]), vernachlässigt – die Gültigkeit dieser Vereinfachung wird im weiteren Verlauf des Abschnitts diskutiert –, so kann die Schallschnelle $\underline{v}_{p,n}(f)$ durch die Schwinggeschwindigkeit $\underline{v}_n(f)$ ersetzt werden

$$\underline{p}(f) \approx \rho c \underline{v}_n(f). \quad (2.13)$$

Dieser Vereinfachung liegt zugrunde, dass die Oberfläche S aus Gleichung (2.9), welche die Struktur umhüllt, direkt an diese Struktur angrenzt und somit mit der schallabstrahlenden Oberfläche S übereinstimmt [36]. Die Vereinfachung aus Gleichung (2.13) entspricht zudem der Annahme [4, S. 459]

$$\sigma(f) = 1. \quad (2.14)$$

Ein konstanter Abstrahlgrad von 1 bedeutet, dass der Abstrahlgrad keinen Einfluss auf die Schallleistung hat. Einsetzen der Annahmen aus den Gleichungen (2.13) und (2.14) in die Gleichungen (2.10) bzw. (2.11) und Integrieren der Gleichung (2.10) über die Fläche S führt jeweils zur äquivalent abgestrahlten Schallleistung (ERP)

$$P_{\text{ERP}}(f) = \frac{1}{2} \rho c S \overline{v_n^2(f)}, \quad (2.15)$$

die sich von Gleichung (2.11) nur durch das Fehlen des Abstrahlgrades ($\sigma(f) = 1$) unterscheidet.

Eine qualitative Darstellung des Abstrahlgrads¹ einer schallabstrahlenden Rechteckplatte im Vergleich zu einem konstanten Abstrahlgrad von 1 ist in Abbildung 2.3 zu sehen. Beide Kurven sind für eine bessere Darstellung als Pegelgrößen dargestellt. In der Pegeldarstellung entspricht ein Abstrahlgrad von 1 einem Abstrahlmaß von 0 dB ($10 \cdot \lg(\sigma/\sigma_0)$ dB mit $\sigma_0 = 1$).

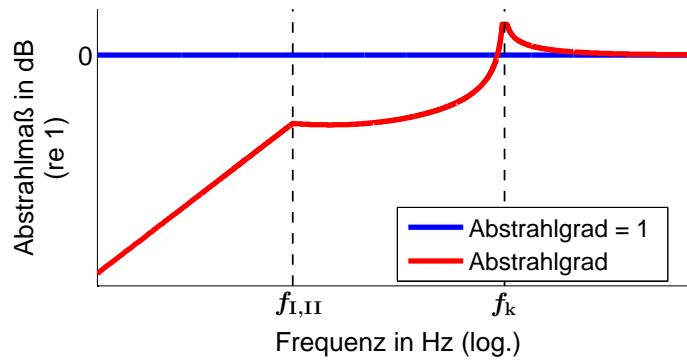


Abbildung 2.3: qualitativer Abstrahlgrad einer schallabstrahlenden Rechteckplatte

Der Abstrahlgrad einer Rechteckplatte weist drei charakteristische Bereiche auf: den Kolbenstrahlerbereich für Frequenzen kleiner einer sogenannten Übergangsfrequenz $f_{I,II}$, den Kurzschlussbereich für Frequenzen zwischen der Übergangsfrequenz $f_{I,II}$ und der Koinzidenzgrenzfrequenz f_k sowie den Bereich der vollen Abstrahlung für Frequenzen größer der Koinzidenzgrenzfrequenz f_k [59, S. 81 ff.]. Die exakte Berechnung der Übergangsfrequenz zwischen Kolbenstrahlerbereich und Kurzschlussbereich ist nicht möglich. Als Orientierung kann allerdings festgehalten werden, dass Frequenzen unterhalb der ersten Eigenfrequenz im Kolbenstrahlerbereich liegen [59, S. 82 f.]. Für Frequenzen unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz weist der Abstrahlgrad Werte kleiner 1 auf, entsprechend liegt das Abstrahlmaß dort unterhalb von 0 dB. In diesem Bereich entspricht die ERP somit einer sehr konservativen Abschätzung der Schallleistung. Im Bereich der Koinzidenzgrenzfrequenz überschreitet das Abstrahlmaß die Grenze von 0 dB. Aufgrund dieser Überhöhung des Abstrahlmaßes, die nur in Ausnahmefällen auftritt [59, S. 70], unterschätzt die ERP dort die Schallleistung. Im Bereich der vollen Abstrahlung konvergiert das Abstrahlmaß gegen 0 dB, weswegen ERP und Schallleistung in diesem Bereich identisch sind. Abstrahlmaßmessungen von Platten zeigen gute Übereinstimmungen mit dem berechneten Abstrahlmaß gemäß Abbildung 2.3. Sie zeigen aber auch, dass die Überhöhung bei der Koinzidenzgrenzfrequenz deutlich niedriger als beim berechneten Abstrahlmaß ausfällt und dass das gemessene Abstrahlmaß im Kurzschlussbereich um das berechnete Abstrahlmaß schwankt [59, S. 94 ff.].

¹ Dabei handelt es sich um den sogenannten vereinfachten Abstrahlgrad, berechnet nach dem modifizierten Maidanik-Verfahren nach Ver und Holmer [59, S. 81 ff.].

An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass im Rahmen dieser Arbeit bei Plattenmodellen nur Frequenzbereiche betrachtet werden, die bei der ersten Eigenfrequenz f_{11} beginnen und deutlich unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz f_k enden. Damit ist für diese Modelle gewährleistet, dass es sich bei der ERP um eine konservative Abschätzung handelt.

2.3 Prinzipien zur Reduktion der Schallabstrahlung

Soll die Schallabstrahlung einer Struktur reduziert werden, so gibt es verschiedene Möglichkeiten für Strukturänderungen. Diese Möglichkeiten werden am Beispiel des Modells einer schwingenden Struktur, siehe Abbildung 2.4, vorgestellt. Die Struktur ist in zwei Bereiche unterteilt und wird im Strukturbereich I durch eine harmonische Kraft F angeregt.

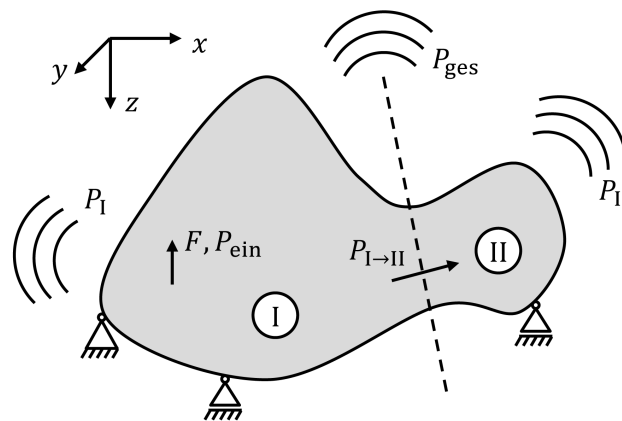


Abbildung 2.4: Leistungen an einer schwingenden Struktur

Grundsätzlich können bei einer Reduktion der Schallabstrahlung drei verschiedene Zielszenarien betrachtet werden, bei denen die Systemgrenze jeweils unterschiedlich gezogen wird:

1. Schallleistung P_I des Strukturbereichs I reduzieren,
2. Schallleistung P_{II} des Strukturbereichs II reduzieren,
3. Schallleistung P_{ges} der gesamten Struktur reduzieren.

Die Schallleistung ist, wie bereits erwähnt, die üblicherweise verwendete Kenngröße zur Bewertung der Schallabstrahlung einer Struktur. Für eine Reduktion der Schallleistung gibt es drei grundlegende Ansatzpunkte, um die Energiemenge, die abgestrahlt werden kann, zu beeinflussen:

1. die Änderung der Energiezufuhr,
2. die Änderung der Energieabfuhr und
3. die Änderung der Energiedissipation.

Die Energieabfuhr bezeichnet dabei alle Wege, über welche die Energie die Systemgrenze verlassen kann, die nicht zur Energiedissipation oder zur Energieabstrahlung gehören. Aufgrund der Energieerhaltung muss in den vorliegenden Szenarien alle Energie, die der Struktur zugeführt wird und nicht über alternative Wege der Abfuhr oder Dissipation „verschwindet“, abgestrahlt werden und damit in die Schallleistung eingehen.

In den Zielszenarien 1 und 3 entspricht eine Reduktion der Energiezufuhr einer Reduktion der Eingangsleistung P_{ein} ,

$$P_{\text{ein}} = F \cdot v_{\text{ein}} = \frac{F^2}{Z_{\text{ein}}}, \quad (2.16)$$

da keine weiteren Energiequellen im Beispielmmodell existieren. Die Eingangsleistung ist abhängig von der Anregungskraft F und der Schwinggeschwindigkeit v_{ein} am Anregungsort oder der quadratischen Anregungskraft F und der Eingangsimpedanz $Z_{\text{ein}} = F/v_{\text{ein}}$. Wird als Randbedingung eine konstante Kraftamplitude angenommen, so bedeutet Gleichung (2.16), dass die Masse m , die Steifigkeit k und/oder die Dämpfung d der Struktur verändert werden müssen, da die Eingangsimpedanz von diesen drei Struktureigenschaften abhängig ist. In Zielszenario 2 entspricht der Energiefluss von Strukturbereich I nach Strukturbereich II der Energiezufuhr, weswegen er zu minimieren ist. Die zugehörige Leistung $P_{\text{I} \rightarrow \text{II}}$ ist abhängig vom Impedanzsprung $Z_{\text{I} \rightarrow \text{II}}$ am Übergang zwischen den Bereichen I und II. Je größer der Impedanzsprung ist, desto mehr Energie wird am Übergang reflektiert und desto weniger Energie fließt in den Strukturbereich II [61, S. 907]. Auch dieser Impedanzsprung kann durch die Änderung der Struktureigenschaften Masse, Steifigkeit und/oder Dämpfung beeinflusst werden.

Den Energiefluss von Strukturbereich I nach Strukturbereich II zu maximieren und dafür den Impedanzsprung $Z_{\text{I} \rightarrow \text{II}}$ zu minimieren, entspricht in Zielszenario 1 der einzigen Möglichkeit, die Energieabfuhr zu erhöhen. In den beiden Zielszenarien 2 und 3 gibt es dagegen keinerlei Möglichkeit, die Energieabfuhr zu beeinflussen.

In allen drei Zielszenarien entspricht die Erhöhung der Energiedissipation einer Erhöhung der Dissipationsleistung. Dies kann durch eine Erhöhung der Dämpfung im jeweiligen Strukturbereich oder der gesamten Struktur erreicht werden.

Eine zusammenfassende Übersicht der Prinzipien zur Schallreduktion ist in Tabelle 2.1 zu finden.

Tabelle 2.1: Prinzipien zur Schallreduktion (im Falle einer konstanten Kraftanregung)
 \downarrow = senken, \uparrow = erhöhen, \updownarrow = ändern

Zielszenario	Energiezufuhr \downarrow	Energieabfuhr \uparrow	Energiedissipation \uparrow
1. Schallleistung $P_{\text{I}} \downarrow$	$P_{\text{ein}} \downarrow \Rightarrow Z_{\text{ein}} \uparrow$	$P_{\text{I} \rightarrow \text{II}} \uparrow \Rightarrow Z_{\text{I} \rightarrow \text{II}} \downarrow$	$P_{\text{diss}} \uparrow$
2. Schallleistung $P_{\text{II}} \downarrow$	$P_{\text{I} \rightarrow \text{II}} \downarrow \Rightarrow Z_{\text{I} \rightarrow \text{II}} \uparrow$	–	$P_{\text{diss}} \uparrow$
3. Schallleistung $P_{\text{ges}} \downarrow$	$P_{\text{ein}} \downarrow \Rightarrow Z_{\text{ein}} \uparrow$	–	$P_{\text{diss}} \uparrow$
1.–3.	$\Rightarrow m, k, d \updownarrow$	$\Rightarrow m, k, d \updownarrow$	$\Rightarrow d \uparrow$

In dieser Arbeit ist es das Ziel, durch Modifikationen in Form von Massen- und/oder Steifigkeitserhöhungen eine Reduktion der Schallabstrahlung zu erreichen. Die Beeinflussung der Dämpfung soll dabei ausgeklammert werden, da diese aufgrund der Energiedissipation einen direkten Einfluss auf die Schallabstrahlung besitzt. Die Ausklammerung einer Dämpfungsänderung bedeutet beispielsweise für Zielszenario 3 – die Reduktion der Schallleistung der gesamten Struktur –, dass die einzige Lösung darin liegt, durch die Erhöhung der Masse und Steifigkeit die Eingangsimpedanz der Struktur zu erhöhen. Damit durch eine Massen- und/oder Steifigkeitserhöhung nicht auch die Dämpfung der Struktur erhöht wird, sollte bei der Modellierung der Modifikationen keine massen- und steifigkeitsproportionale Dämpfungsdefinition verwendet werden.

3 Analysemethode, Modellaufbau und Voruntersuchung

In diesem Kapitel wird die Ausgangsbasis für die durchgeführten Untersuchungen zur Entwicklung von Modifikationsregeln beschrieben. Zunächst wird die Analysemethode zur Bestimmung der betrachteten Zielgrößen erläutert. Anschließend werden die numerischen und experimentellen Modelle, die in dieser Arbeit untersucht werden, vorgestellt. Zum Abschluss wird untersucht, inwieweit sich die äquivalent abgestrahlte Schallleistung als Bewertungsgröße qualitativer Änderungen der Schallabstrahlung aufgrund von Modifikationen eignet. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchung sind relevant für die Bewertung der späteren Ergebnisse in den Kapiteln 4 und 5. Alle numerischen Modelle werden in ABAQUS/CAE aufgebaut und mit ABAQUS/STANDARD als Solver berechnet.

3.1 Vorstellung der Analysemethode zur Bestimmung der betrachteten Strukturgrößen

Zu den physikalischen Größen aller Modelle, die Teil des Strukturverhaltens und in dieser Arbeit von Interesse sind, gehören die STI und die ERP im eingeschwungenen Zustand für verschiedene Anregungsfrequenzen f_{AF} . Als Anregungsfrequenzen f_{AF} werden die Eigenfrequenzen f_{EF} der jeweiligen Modelle gewählt, weil diese bei einer geringen Modelldämpfung – wie es in den vorliegenden Modellen der Fall ist – nahezu mit den Resonanzfrequenzen der Modelle übereinstimmen. In den Resonanzfrequenzen antwortet eine Struktur mit deutlich größeren Schwingungsamplituden. Deshalb ist dort die Schallabstrahlung auch wesentlich höher als in den dazwischenliegenden Frequenzen. Mit Abbildung 3.1, die den qualitativen Verlauf der ERP-Pegel über der Frequenz dargestellt, wird dieser Zusammenhang verdeutlicht.

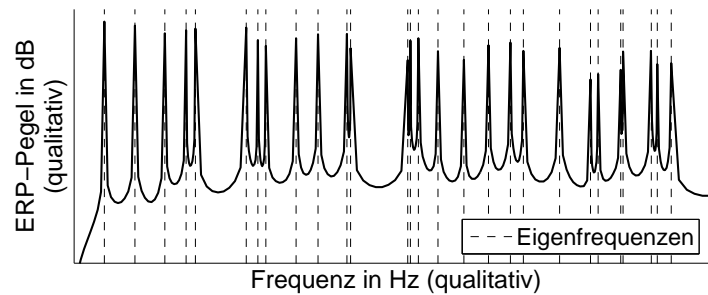


Abbildung 3.1: qualitativer Verlauf der ERP-Pegel über der Frequenz

Das methodische Vorgehen zur Bestimmung des Strukturverhaltens ist bei allen Modellen identisch und in Abbildung 3.2 zusammengefasst. Zunächst wird eine Modalanalyse zur Bestimmung der Eigenfrequenzen durchgeführt (1). Neben den Eigenfrequenzen liefert die Modalanalyse auch die Eigenschwingformen \underline{U} . Im nächsten Schritt werden an den ersten N Eigenfrequenzen f_{EF_n} harmonische Analysen durchgeführt (2) – für die Anregungsfrequenzen f_{AF_n} gilt somit $f_{AF_n} = f_{EF_n}$. Die harmonischen Analysen liefern alle notwendigen Strukturgrößen $\underline{N}_i(f_{AF_n})$, $\underline{Q}_i(f_{AF_n})$, $\underline{M}_i(f_{AF_n})$, $\underline{\ddot{v}}(f_{AF_n})$ und $\underline{\dot{\varphi}}(f_{AF_n})$ für die Berechnungen der STI $\underline{\vec{I}}_{S,a}(f_{AF_n})$ und der ERP $P_{ERP}(f_{AF_n})$. Das Vektorfeld der Schwinggeschwindigkeiten $\underline{V}(f_{AF_n})$ wird auch Betriebsschwingform² (BSF) genannt. Anschließend werden im Postprocessing (3) die Strukturgrößen STI und ERP gemäß den Gleichungen (2.7) bzw. (2.15) berechnet. Im Rahmen der Modellvorstellungen in Abschnitt 3.2 wird im Postprocessing auch die Eingangsleistung $P_{ein}(f_{AF_n})$ gemäß Gleichung (2.16) für jede Anregungsfrequenz f_{AF_n} bestimmt.

² Betriebsschwingformen werden in dieser Arbeit damit anhand der Schwinggeschwindigkeiten und nicht der Auslenkungen beschrieben, da auch die Schwinggeschwindigkeiten von Interesse sind. Die Eigenschwingformen beschreiben dagegen Auslenkungen.

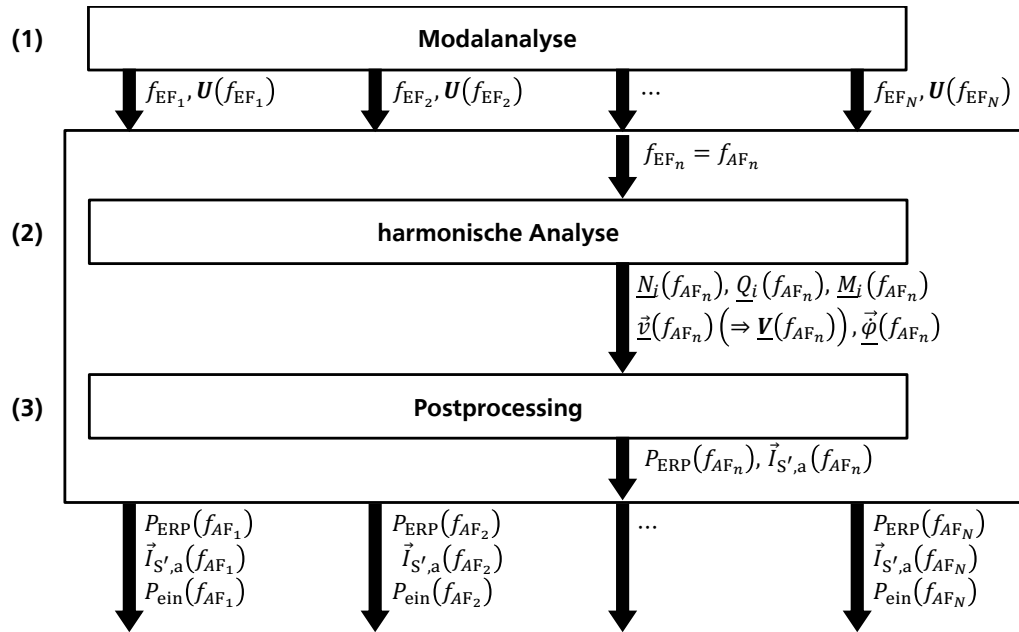


Abbildung 3.2: Analysemethode zur Bestimmung des Strukturverhaltens

Bei modifizierten Strukturen werden – selbst bei sehr kleinen Modifikationen – die Eigenfrequenzen wie auch die Eigenschwingformen der jeweiligen Modelle im Vergleich zur unmodifizierten Struktur verändert. Die unmodifizierten Strukturen werden im Rahmen dieser Arbeit Basismodelle genannt. Aus diesem Grund ist ein Vergleich aller Modelle in exakt den Anregungsfrequenzen des Basismodells nicht sinnvoll. In dem Fall könnte eine verringerte ERP einer modifizierten Struktur lediglich daran liegen, dass die Anregung neben einer Eigenfrequenz der modifizierten Struktur liegt. In dieser Arbeit werden daher, wie bereits beschrieben, alle Strukturen in ihren Eigenfrequenzen und nicht denen des Basismodells angeregt. Verglichen werden anschließend immer die Ergebnisse aller Strukturen bei Anregung in ihrer n -ten Eigenfrequenz. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden diese n harmonischen Analysen entsprechend der Reihenfolge des Auftretens der Eigenfrequenzen der jeweiligen Modelle mit „Anregungsmoden“ n bezeichnet. Aufgrund der ausschließlichen Analyse der Strukturen in den Anregungsmoden wird die ERP im Folgenden auch nur über den Anregungsmoden aufgetragen. Qualitativ unterscheidet sich diese Darstellungsform der ERP-Pegel stark vom realen Verlauf der ERP-Pegel über der Frequenz. Dieser Unterschied kann Abbildung 3.3 entnommen werden.

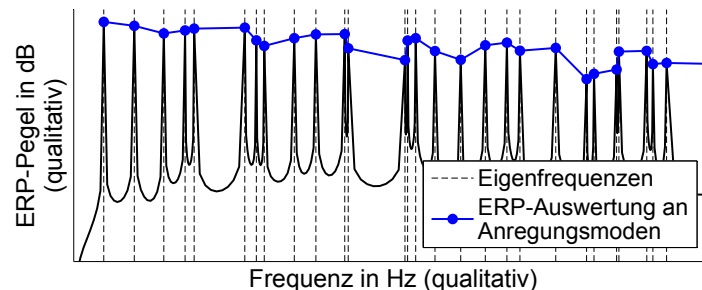


Abbildung 3.3: qualitativer Verlauf der ERP-Pegel bei alleiniger Auswertung an den Anregungsmoden

Die Punkte im Verlauf markieren dabei im Folgenden die Auswertepunkte. Die durchgezogene Linie dient lediglich der Information, dass alle Auswertepunkte zum gleichen Modell gehören.

3.2 Vorstellung der verwendeten Basismodelle und Modifikationen

Die Untersuchungen zur Entwicklung von Modifikationsregeln werden an zwei Basismodellen unterschiedlicher Komplexität durchgeführt. Beide Basismodelle werden jeweils mehrfach modifiziert, sodass mehrere ähnliche, aber doch verschiedene Strukturen entstehen. In diesem Abschnitt werden zunächst der Aufbau und das Strukturverhalten der numerischen Basismodelle und anschließend die numerische Umsetzung der Modifikationen vorgestellt. Zum Abschluss werden der Prüfstands Aufbau und das Strukturverhalten des experimentellen Basismodells der Platte beschrieben.

3.2.1 Aufbau und Strukturverhalten der numerischen Modelle

Bei den verwendeten, nun nacheinander vorgestellten Basismodellen handelt es sich um eine Rechteckplatte und den Gepäckraumboden eines Pkws.

Basismodell der Platte

Das Plattenmodell, siehe Abbildung 3.4, besitzt die Abmessungen $0,87\text{ m} \times 0,62\text{ m} \times 0,005\text{ m}$ für die Länge l_x , die Breite l_y bzw. die Dicke h .

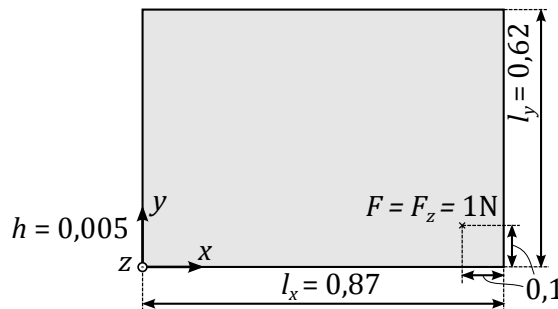


Abbildung 3.4: Basismodell der Platte (Abmessungen in m)

Die Anregung der Platte erfolgt über eine Punktkraft F_z mit einer Amplitude von 1 N in z -Richtung an der Position $0,77\text{ m} \times 0,1\text{ m}$. Die Platte ist an allen vier Rändern gelenkig gelagert. Die Platte wird als Schalenmodell aufgebaut und mit linearen³ Viereckselementen (S4R) [62, Kap. 29.6] vernetzt. Die Kantenlängen aller Elemente betragen 10 mm. Da die Platte bei Frequenzen unterhalb von 860 Hz analysiert wird, entspricht die Kantenlänge einer Vernetzung von mindestens 22 Elementen pro Wellenlänge⁴. Das Material der Platte ist Stahl, was bei den gegebenen Plattenabmessungen zu einer Gesamtmasse des Modells von 21,17 kg führt. Die verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Materialparameter der Platte (Stahl)

Dichte ρ	Elastizitätsmodul E	Querkontraktion μ	Strukturdämpfung η
7850 kg/m^3	$2,0405 \cdot 10^{11}\text{ N/m}^2$	0,28	0,0001

³ Bei gleicher Knotenanzahl müssten bei einer quadratischen Ansatzfunktion weniger Elemente verwendet werden, was im Normalfall zu bevorzugen wäre. In dieser Arbeit werden aber bewusst lineare Ansatzfunktionen und dafür mehr Elemente verwendet, da für die Untersuchungen in Kapitel 5 eine hohe örtliche Auflösung der Modelle relevant ist, die direkt durch die Elementanzahl bestimmt wird.

⁴ Die Anzahl der Elemente pro Wellenlänge bestimmt sich aus dem Verhältnis von der Biegewellenlänge bei der jeweiligen Frequenz und der Kantenlänge der Elemente. Die Biegewellenlänge wiederum bestimmt sich aus dem Verhältnis von der frequenzabhängigen Biegewellenausbreitungsgeschwindigkeit und der Frequenz.

Bei der Strukturdämpfung handelt es sich um den Verlustfaktor. Der Begriff Strukturdämpfung wird in Anlehnung an die Dämpfungsdefinition in ABAQUS/CAE verwendet, da diese dort als „structural damping“ umgesetzt wird. Die erste Eigenfrequenz f_{EF_1} der Platte liegt bei 47,14 Hz, die 25. Eigenfrequenz $f_{EF_{25}}$ bei 853,29 Hz. Die Werte der Eigenfrequenzen 1–25 können der Tabelle A.1 im Anhang entnommen werden. Die berechneten Pegel der ERP und der Eingangsleistung für die Anregungsmoden 1–25 sind in Abbildung 3.5 zu sehen.

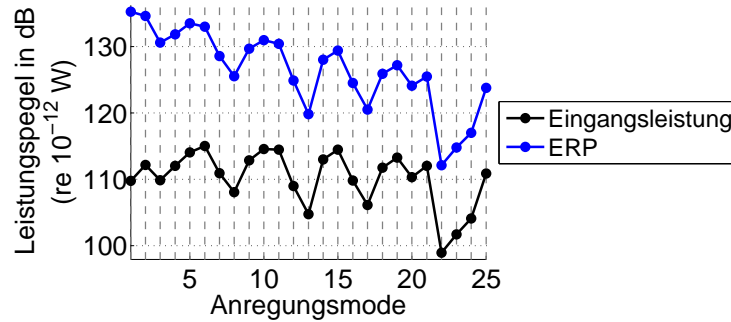


Abbildung 3.5: Pegel der Eingangsleistung und ERP bei der Platte für die Anregungsmoden 1–25

Die Pegel der ERP liegen deutlich (12–26 dB) über den Eingangsleistungspegeln. Die qualitativen Verläufe beider Kurven ähneln sich – ausgenommen die Tatsache, dass die ERP-Pegel mit zunehmender Anregungsmode einem Abwärtstrend folgen. Die Wertunterschiede sowie der Abwärtstrend resultieren aus der Vernachlässigung des Abstrahlgrades bei den ERP-Pegeln, vergleiche Abschnitt 2.2. Dass sich die Pegel beider Leistungen für die verschiedenen Anregungsmoden unterscheiden, hängt mit der Position der Kraftanregung in Bezug zur Lage der Schwingungsbäuche und -täler derjenigen Eigenschwingform zusammen, die zur Anregungsfrequenz gehört (zur Erinnerung: die Anregungsfrequenzen entsprechen den Eigenfrequenzen der Struktur); denn aufgrund der geringen Strukturdämpfung dominiert diese Eigenschwingform die durch die Kraftanregung resultierende Betriebsschwingform. Beide Zusammenhänge werden anhand der Abbildungen 3.6 bzw. 3.7 veranschaulicht.

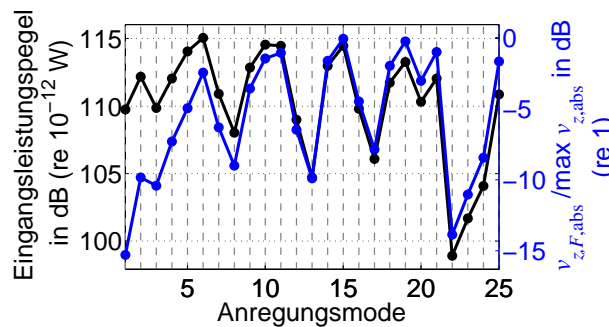


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung von Eingangsleistungspegel und Verhältnispegel aus der Schwinggeschwindigkeit am Anregungsort und der maximalen Schwinggeschwindigkeit $v_{z,F,abs} / \max(v_{z,abs})$ bei der Platte

Abbildung 3.6 zeigt eine Gegenüberstellung des Eingangsleistungspegels mit dem Verhältnispegel der Schwinggeschwindigkeit am Anregungsort $v_{z,F,abs}$ und der maximalen Schwinggeschwindigkeit $\max(v_{z,abs})$ – bei beiden Schwinggeschwindigkeiten handelt es sich um den Betrag (Amplitude) der komplexen Schwinggeschwindigkeiten in z -Richtung. Da die Schwingformverläufe kontinuierlich sind, spiegelt das Verhältnis $v_{z,F,abs} / \max(v_{z,abs})$ den Abstand zwischen dem Anregungsort und den Extremwerten der Schwingungsbäuche und -täler wider. Je kleiner dieses Schwinggeschwindig-

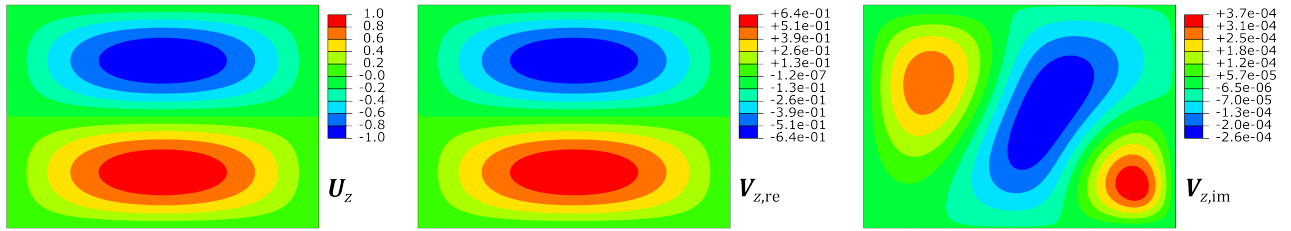


Abbildung 3.7: Vergleich der 3. Eigenschwingform (U_z) und der Betriebsschwingform ($V_{z,re}$, $V_{z,im}$) für die Anregungsmoden 3 bei der Platte

keitsverhältnis ist, desto weiter liegt die Anregung von einem Schwingungsbauch oder -tal entfernt. Wie Abbildung 3.6 zeigt, weisen die Pegel von Eingangsleistung und diesem Schwinggeschwindigkeitsverhältnis das gleiche tendenzielle Verhalten über den Anregungsmoden auf. Daher kann geschlossen werden, dass die Höhe der Eingangsleistung von der Position der Kraftanregung in Bezug zur Eigenschwingform abhängig ist: Je näher die Kraft an einem Schwingungsbauch liegt, desto höher fällt die Eingangsleistung aus. Abbildung 3.7 zeigt zur Verdeutlichung der Dominanz der zur Anregungsfrequenz gehörenden Eigenschwingform U auf die Betriebsschwingform \underline{V} beide Größen für die 3. Eigenfrequenz bzw. die Anregungsmoden 3. Es wird jeweils die z -Komponente der Schwingformen gezeigt, da die Amplituden der beiden anderen Komponenten aufgrund der Anregung in z -Richtung nahe Null liegen. Die Betriebsschwingform ist in Form von Real- ($\text{Re}\{\underline{V}_z\} = V_{z,re}$) und Imaginärteil ($\text{Im}\{\underline{V}_z\} = V_{z,im}$) dargestellt. Real- und Imaginärteil können im eingeschwungenen Zustand anschaulich als zwei „Momentaufnahmen“ der Strukturschwingung, die um 90° phasenversetzt sind, angesehen werden. Durch beide Werte können alle anderen Schwingungszustände bei den Phasenlagen $0^\circ - 360^\circ$ bestimmt werden. Die Vergleiche aller Eigen- und Betriebsschwingformen sind in den Abbildungen A.1 – A.3 im Anhang zu finden. Die Dominanz der Eigenschwingform auf die Betriebsschwingform ist im Realteil $V_{z,re}$ zu erkennen: Eigenschwingform und Realteil $V_{z,re}$ ähneln sich qualitativ sehr stark. Der Imaginärteil unterscheidet sich dagegen sehr stark von der Eigenschwingform, allerdings sind hier die Amplituden im Vergleich zum Realteil um 3 Größenordnungen geringer, was an den jeweiligen Farbskalen ablesbar ist. Das Amplitudenverhältnis zwischen Real- und Imaginärteil ist abhängig von der Dämpfung. Zur Verdeutlichung dieser Tatsache ist in Abbildung 3.8 das Verhältnis der maximalen Geschwindigkeitsamplituden von Real- zu Imaginärteil für 5 verschiedene Strukturdämpfungen η für die Anregungsmoden 1–25 abgebildet.

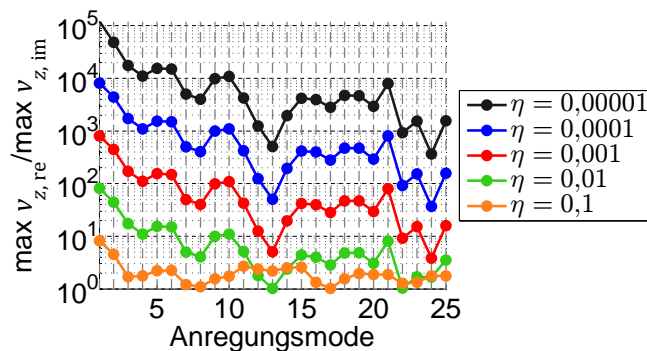


Abbildung 3.8: Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit \underline{v}_z über der Anregungsmoden n für verschiedene Strukturdämpfungen η bei der Platte

Bei geringen Strukturdämpfungen ($\eta \leq 0,01$ im Beispiel des Plattenmodells) verschieben sich mit zunehmender Dämpfung die Amplitudenverhältnisse und die Amplituden im Imaginärteil steigen an,

während die des Realteils sinken. Das Verhältnis von Real- und Imaginärteil variiert zudem mit der Anregungsmode. Bei höheren Dämpfungen ($\eta > 0,01$) hingegen sinken die Amplitudenverhältnisse nicht konstant weiter ab, sondern der Verlauf ändert sich, was beispielsweise für $\eta = 0,1$ im Bereich der Anregungsmoden 10–15 sichtbar wird. Für alle Anregungsmoden liegt die Amplitude des Imaginärteils für die verwendete Strukturdämpfung $\eta = 0,0001$ aber unterhalb der Amplitude des Realteils.

Der qualitative STI-Verlauf in der Platte wird exemplarisch für die Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 in Abbildung 3.9 vorgestellt. Im Anhang findet sich die Gesamtübersicht der quantitativen STI-Verläufe für die Anregungsmoden 1–25 (Abbildungen A.1 – A.3).

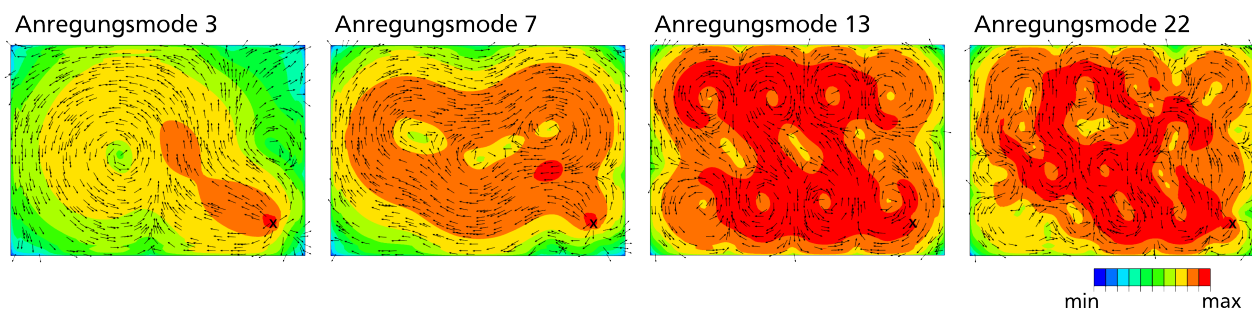


Abbildung 3.9: qualitative Verläufe der STI bei der Platte für die Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22

Der STI-Verlauf verästelt sich zunehmend mit steigender Frequenz, d. h. mit steigender Anregungsmode treten mehr Wirbel und Pfade auf – die Pfade werden dafür schmaler. Weiterhin unterscheidet sich die Verteilung der Flussdichte innerhalb der Platte. In Anregungsmode 3 beispielsweise nimmt die Flussdichte ausgehend vom Ort der Kraftanregung (\times) stark ab, dagegen fließt in Anregungsmode 22 in größeren Teilen der Platte eine, im Vergleich zur maximalen Flussdichte, hohe Energiemenge (ein größerer Bereich ist rot). Auch die Position der Kraftanregung (vergleiche Abbildung 3.4) ist unterschiedlich gut anhand der STI-Verläufe zu erkennen. In den Anregungsmoden 3 und 7 lässt sich der Anregungsort klar, in Anregungsmode 22 mäßig und in Anregungsmode 13 gar nicht identifizieren. Interessanterweise kann festgestellt werden, dass sich der Anregungsort in genau den drei Anregungsmoden (12, 13 und 24) nicht identifizieren lässt, in denen das Verhältnis $\max v_{z, \text{re}} / \max(v_{z, \text{im}})$ bei $\eta = 0,0001$ kleine Werte im Vergleich zu den Nachbarwerten aufweist (siehe Abbildung 3.8). Ob es sich bei dieser Beobachtung um einen Sonderfall handelt oder ob sie einen allgemeingültigen Zusammenhang beschreibt, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Dies müsste in separaten Untersuchungen gezielt erforscht werden, was allerdings am Thema dieser Arbeit vorbeigeht.

Basismodell des Gepäckraumbodens

Der Gepäckraumboden ist hinsichtlich der Länge und Breite größer als die Platte, mit einer Dicke von $h = 0,705$ mm dagegen dünner als die Platte, siehe Abbildung 3.10.

Auch der Gepäckraumboden ist an allen Außenkanten gelenkig gelagert und wird mit einer Punktkraft $F_z = 1$ N angeregt. Als Material wird ebenfalls Stahl mit den Materialparametern ρ und μ aus Tabelle 3.1 verwendet. Der Elastizitätsmodul E und die Strukturdämpfung η sind mit $2,1 \cdot 10^{11}$ N/m² bzw. 0,001 in diesem Modell höher angesetzt.⁵ Die resultierende Gesamtmasse des Gepäckraumbodens beträgt 12,1 kg. Die Kantenlänge der verwendeten linearen Drei- und Viereckselemente (S3R, S4R)

⁵ Alle Materialparameter werden vom Gepäckraumbodenmodell bei HERING [23] übernommen, um die Möglichkeit von Modellvergleichen offen zu halten.

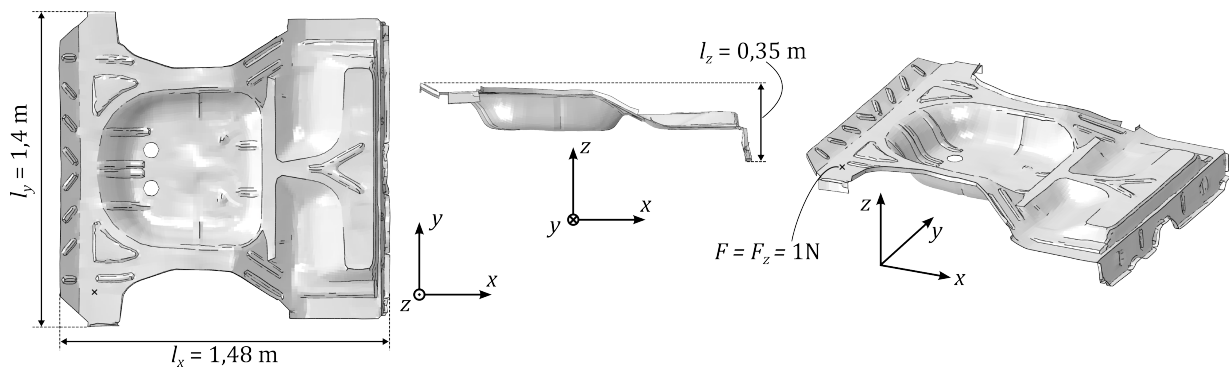


Abbildung 3.10: Basismodell des Gepäckraumbodens

beträgt durchschnittlich 12 mm. Die höchste Frequenz, mit der das Modell analysiert wird, beträgt 220 Hz. Damit sind in diesem Modell im Durchschnitt sogar mindestens 39 Elemente pro Wellenlänge vorhanden. Die ersten 25 Eigenfrequenzen des Modells liegen zwischen 39,1 Hz und 214,78 Hz. Die Werte der ersten 25 Eigenfrequenzen können Tabelle A.2 im Anhang entnommen werden.

Die Pegel der Eingangsleistung und der ERP des Gepäckraumbodens sind für die Anregungsmoden 1–25 in Abbildung 3.11 dargestellt.

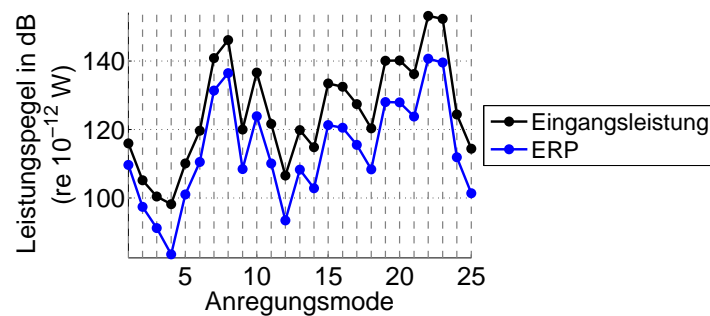


Abbildung 3.11: Pegel der Eingangsleistung und ERP beim Gepäckraumboden für die Anregungsmoden 1–25

Im Gegensatz zur Platte zeigt sich hier, dass die ERP-Pegel für alle Anregungsmoden 6–13 dB unterhalb der Eingangsleistungspegel liegen. Aufgrund der gekrümmten Geometrie ist davon auszugehen, dass beim Gepäckraumboden kein oder nur ein lokal stark begrenzter akustischer Kurzschluss stattfindet, sodass der Abstrahlgrad bereits ab der ersten Anregungsmodus nahe 1 liegt. Dementsprechend ist es schlüssig, dass die ERP die Schallleistung nicht oder nur kaum überschätzt und somit auch nicht oberhalb der Eingangsleistung liegt. Die Differenz zwischen Eingangsleistung und ERP kann daher der Dissipationsleistung aufgrund der Materialdämpfung zugeordnet werden. Da die Strukturdämpfung um den Faktor 10 höher als bei der Platte liegt, ist die Dissipationsleistung deutlich höher.

Die Gegenüberstellung der 3. Eigenschwingform und der Betriebsschwingform für die Anregungsmodus 3 ist in Abbildung 3.12 zu sehen. Es wird jeweils nur die z -Komponente der Schwingformen gezeigt, um zwischen Schwingungsbäuchen und -tälern unterscheiden zu können. Alle weiteren Gegenüberstellungen sind im Anhang in den Abbildungen A.4–A.7 zusammengefasst.

Auch beim Gepäckraumboden dominiert die n -te Eigenschwingform die Betriebsschwingform der Anregungsmodus n . In Abbildung 3.12 liegt eine Phasenverschiebung von 180° zwischen der Eigenschwingform und dem Realteil der Betriebsschwingform vor (Schwingungsbäuche und -täler sind vertauscht). Dies liegt daran, dass die Kraft den Gepäckraumboden dort im Bereich einer negativen

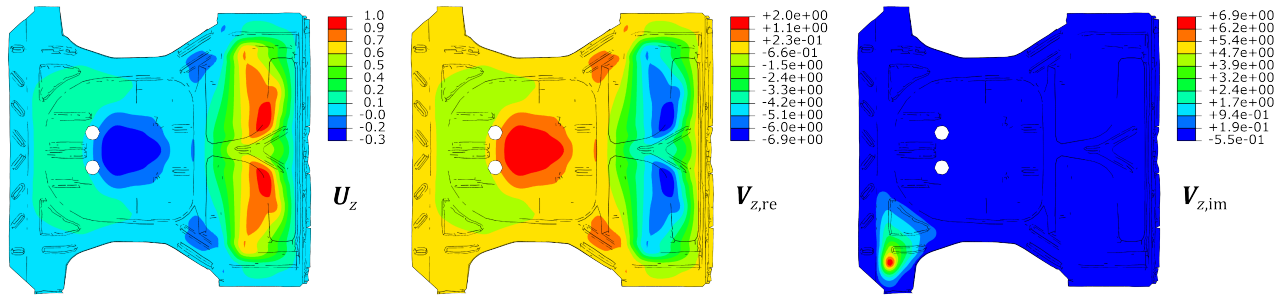


Abbildung 3.12: Vergleich der 3. Eigenschwingform (U_z) und der Betriebsschwingform ($V_{z,re}$, $V_{z,im}$) für die Anregungsmode 3 beim Gepäckraumboden

Auslenkung der Eigenschwingform ($U_z(x_F, y_F, z_F) = -2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) anregt. Die maximalen Amplituden des Imaginärteils liegen beim Gepäckraumboden, im Gegensatz zur Platte, nicht deutlich unter denen des Realteils. Das Verhältnis der maximalen Amplituden von Real- zu Imaginärteil ist in Abbildung 3.13 zu sehen.

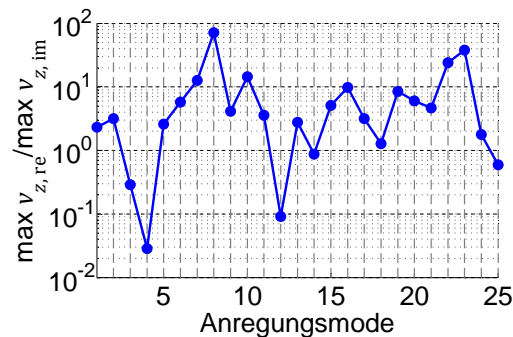


Abbildung 3.13: Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit \underline{v}_z über der Anregungs-mode n beim Gepäckraumboden

Es treten sowohl Verhältniswerte oberhalb als auch unterhalb von 1 (10^0) auf. Dementsprechend ist die maximale Amplitude des Imaginärteils in Abhängigkeit von der Anregungsmode auch kleiner oder sogar größer als die maximale Amplitude des Realteils der Schwinggeschwindigkeit. Auf dieses Verhältnis zwischen den maximalen Geschwindigkeitsamplituden des Real- und Imaginärteils wird in Kapitel 5 im Rahmen der Ergebnisauswertung eingegangen.

Der Verlauf der STI im Gepäckraumboden ist qualitativ in Abbildung 3.14 für die Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 dargestellt. Die quantitativen Verläufe für die Anregungsmoden 1–25 sind im Anhang in den Abbildungen A.4–A.7 zu finden.

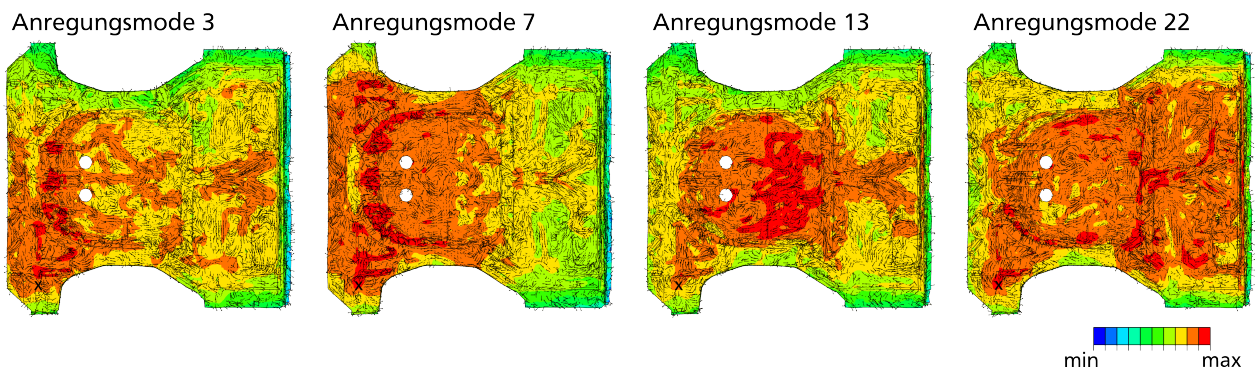


Abbildung 3.14: qualitative Verläufe der STI beim Gepäckraumboden für die Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22

Aufgrund der Krümmungen ist der STI-Verlauf beim Gepäckraumboden bereits bei niedrigen Anregungsmoden stark verästelt. Wie beim Modell der Platte unterscheiden sich die Verteilungen der Energiemenge innerhalb der Struktur für die verschiedenen Anregungsmoden stark voneinander.

3.2.2 Aufbau der numerischen Modifikationen

In dieser Arbeit sollen Strukturen dort modifiziert werden, wo es eine noch nicht näher spezifizierte Modifikationsregel vorgibt. Idealerweise kann die numerische Umsetzung der Modifikation automatisiert erfolgen. Eine solche Automatisierung der Modellanpassung ist sowohl für ebene Strukturen, wie die Platte, als auch gekrümmte Strukturen, wie den Gepäckraumboden, erwünscht. Eine Möglichkeit, diese Anforderung zu erfüllen, ist es, potenzielle Modifikationsorte an das FE-Netz des numerischen Modells zu koppeln und einen elementbezogenen Modifikationsaufbau zu verwenden. Weiterhin sollen die Modifikationen Masse und/oder Steifigkeit der Struktur erhöhen können, ohne die Dämpfung zu beeinflussen (vergleiche Abschnitt 2.3).

Für eine elementbezogene Massen- oder Steifigkeitsänderung bietet sich in ABAQUS/CAE die sogenannte „Skin reinforcement“, im Folgenden kurz „Skin“ genannt, an. Dabei handelt es sich um eine Schalenverstärkung, die sich wie eine „Haut“ auf eine zugrunde liegende Geometrie legt und mittels der dieser Strukturregion zusätzliche Struktureigenschaften (Materialparameter und Strukturdicke) zugewiesen werden können [63, Kap. 36]. Wird die Skin vernetzt, so nutzt sie die Netztopologie der zugrunde liegenden Geometrie. Es werden neue Elemente erzeugt, welche die bestehenden Knoten verwenden. Den Skin-Elementen wird in dieser Arbeit der gleiche Elementtyp zugewiesen, den das Element des zugrunde liegenden Netzes aufweist (S4R oder S3R). Die Masse

$$m_{\text{Skin}} = A_{\text{Skin}} \cdot h_{\text{Skin}} \cdot \rho_{\text{Skin}}, \quad (3.1)$$

welche die Skin zur Struktur hinzufügt, wird durch die Fläche A_{Skin} , Dicke h_{Skin} und Dichte ρ_{Skin} der Skin bestimmt. Die durch die Skin zusätzlich in die Struktur eingebrachte Steifigkeit

$$k_{\text{Skin}} = f(A_{\text{Skin}}, h_{\text{Skin}}, E_{\text{Skin}}, g_{\text{Skin}}), \quad (3.2)$$

ist abhängig von der Fläche, der Dicke und dem Elastizitätsmodul E_{Skin} der Skin sowie dem resultierenden Geometrieinfluss g_{Skin} . Die Steifigkeitserhöhung lässt sich für kontinuierliche Strukturen im Gegensatz zur Massenerhöhung aber nicht quantitativ bestimmen, da sich der Geometrieinfluss g_{Skin} auf die Steifigkeit nicht direkt beschreiben lässt. Nichtsdestotrotz kann die Steifigkeitserhöhung verschiedener Modifikationen anhand der bekannten Werte für die Fläche, die Dicke und den Elastizitätsmodul der Skin vergleichend bewertet werden. Bei ansonsten gleichen Randbedingungen fügt eine Modifikation mit einem beispielsweise doppelten Elastizitätsmodul dem Basismodell eine größere Steifigkeitserhöhung zu als eine Modifikation mit einem einfachen Elastizitätsmodul.

3.2.3 Aufbau des Prüfstands und Strukturverhalten des experimentellen Modells

Experimentelle Untersuchungen werden am Ende der Arbeit zur Validierung der numerisch abgeleiteten Designregeln durchgeführt. In allen experimentellen Untersuchungen wird die Modellgeometrie der Platte verwendet. Es erfolgt allerdings kein Modellabgleich zwischen dem numerischen und dem experimentellen Plattenmodell mit dem Ziel, beide Modelle einander anzugleichen. Dies hat

zwei Gründe. Zum einen sind eine ideale gelenkige Lagerung sowie eine Anregung durch eine Punktkraft ohne Rückkopplung, wie sie in der numerischen Simulation verwendet werden, in der Realität schwierig umzusetzen. Eine reale Lagerung bringt in der Regel eine zusätzliche, im Vergleich zur Materialdämpfung hohe Dämpfung in das System ein, was eine Auswirkung auf alle Strukturgrößen hat. Eine harmonische Anregung wird meist, so wie auch in dieser Arbeit, mit einem elektrodynamischen Shaker realisiert. Dieser verändert die Struktur und damit das Strukturverhalten aufgrund seiner Masse und der steifen Anbindung. Für einen Modellabgleich müsste daher das numerische Modell angepasst werden. Aus wissenschaftlichen Gründen soll das numerische Plattenmodell aber so grundlagenorientiert und einfach wie möglich sein, was gegen eine Modellanpassung jeglicher Art spricht. Zum anderen handelt es sich bei der in dieser Arbeit durchgeführten Validierung um die Überprüfung der Allgemeingültigkeit der Designregeln. Dafür ist es nicht notwendig, in den numerischen Simulationen und in den experimentellen Untersuchungen die gleichen Modelle zu verwenden. Im Gegenteil ist es sogar von Vorteil, wenn die experimentellen Untersuchungen die numerisch getroffenen Aussagen an anderen, nicht idealisierten Strukturen bestätigen. Zur besseren Charakterisierung des experimentellen Plattenmodells werden in diesem Abschnitt die gemessenen Ergebnisse dennoch teilweise mit denen des numerischen Plattenmodells verglichen.

Die Umsetzung der gelenkigen Lagerung erfolgt im experimentellen Prüfstand durch einen umlaufenden Linienkontakt auf der Plattenober- und -unterseite. Physisch wird der Linienkontakt durch einen 2 mm dicken Kupferdraht ermöglicht, der wiederum auf zwei dünnen Blechrahmen – der eine für die obere, der andere für die untere Lagerung – fixiert ist. Beide Blechrahmen samt Platte werden zwischen zwei massiven Lagerrahmen aus Stahl eingelegt, die miteinander verschraubt werden. Der Aufbau der Lagereinheit ist in Abbildung 3.15 schematisch dargestellt. Links ist die untere Hälfte der Lagereinheit mit Platte als Explosionsansicht und rechts die gesamte Lagereinheit mit Platte als Schnittansicht abgebildet.

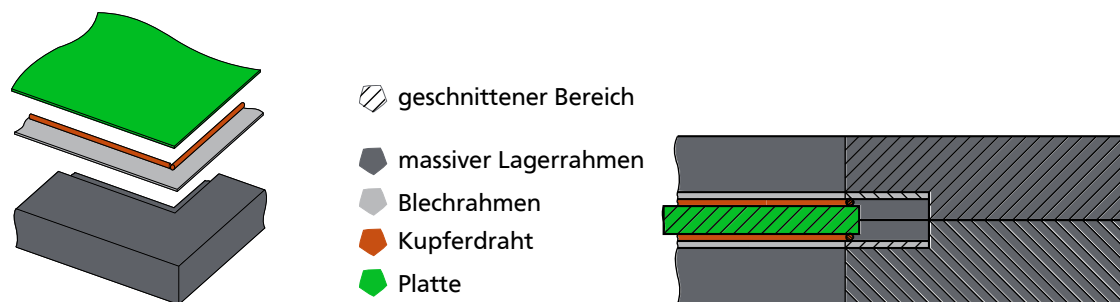


Abbildung 3.15: schematische Darstellung der gelenkigen Plattenlagerung im Prüfstand

Die Innenabmessungen der beiden massiven Lagerrahmen betragen $0,87\text{ m} \times 0,62\text{ m}$. Um die Platte in die Lagereinheit einbauen und auf die Kupferdrähte auflegen zu können, besitzt sie ein allseitiges Aufmaß von 5 mm. Die Plattenabmessungen betragen damit $0,88\text{ m} \times 0,63\text{ m} \times 0,005\text{ m}$. Die gesamte Lagereinheit ist auf einer schwingungsentkoppelten, massiven Box aufgeschraubt. Oberhalb der Box mit der gelagerten Platte und um sie herum steht ein Gerüst aus Aluminiumprofilen, das der Befestigung eines Scanning-Vibrometers dient. Der gesamte Prüfstandsaufbau mitsamt der Messtechnik ist in Abbildung 3.16 zu sehen.

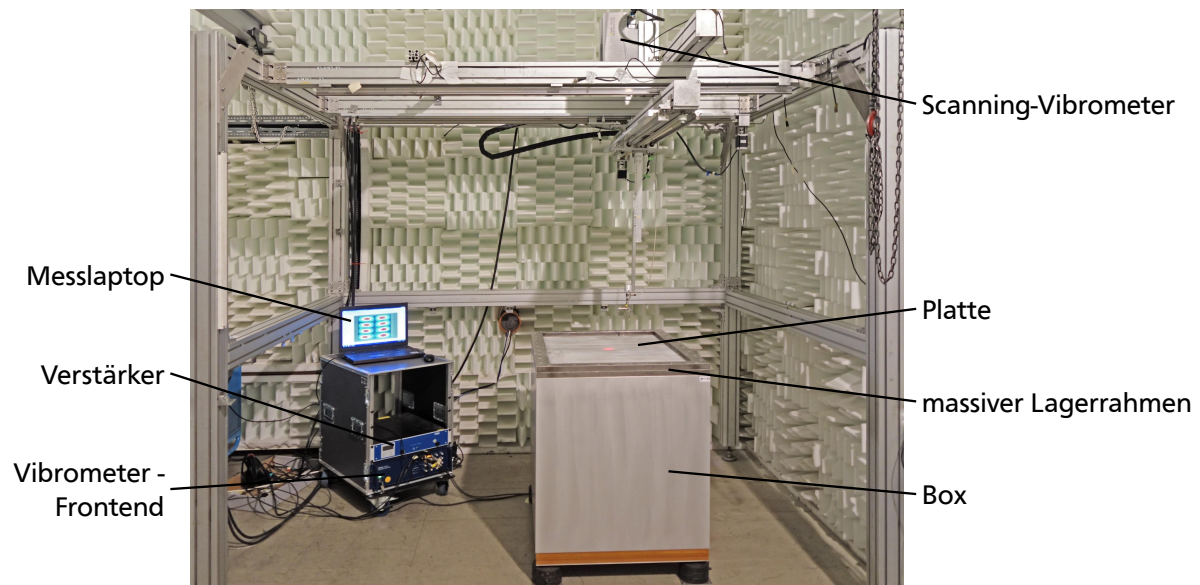


Abbildung 3.16: Prüfstands Aufbau

Die Anregung der Platte erfolgt über einen elektrodynamischen Shaker, der sich innerhalb der Box befindet und die Platte an ihrer Unterseite anregt. Aus diesem Grund ist er nicht in Abbildung 3.16 zu sehen. Der Shaker ist über ein Stativ höhenverstellbar und über eine Gewindestange in Richtung Platte am oberen Ende mit einem Impedanzmesskopf verbunden. Dieser wiederum ist über einen kleinen Fuß mit der Platte verklebt. Oberhalb der Platte ist das Scanning-Vibrometer (PSV 500) der Firma Polytec angebracht. Damit können die Schwinggeschwindigkeiten der Plattenoberfläche an definierten Messpunkten gemessen werden. Für die Erzeugung des Anregungssignals sowie für die Aufnahme der Messdaten wird die systemzugehörige Elektronikeinheit (Vibrometer-Frontend) und ihre Software verwendet. Das Anregungssignal für den Shaker wird über den Verstärker ausgegeben. Aus den Messungen der Schwinggeschwindigkeiten werden gemäß Gleichung (2.15) die ERP für verschiedene Anregungsfrequenzen bestimmt.

In einem ersten Schritt zur experimentellen Charakterisierung der Platte sind, wie auch bei den numerischen Modellen, die Anregungsfrequenzen für die harmonischen Analysen zu definieren. Als Anregungsfrequenzen sollen Resonanzfrequenzen der Platte verwendet werden. Zur Bestimmung der Resonanzfrequenzen wird die Platte mit einem „periodic chirp“ von 40 bis 600 Hz angeregt und es werden die Schwinggeschwindigkeiten der Plattenoberfläche erfasst. Die Resonanzfrequenzen können anhand der Peaks im ERP-Spektrum, welches gemäß Gleichung (2.15) aus den Schwinggeschwindigkeiten bestimmt wird, ermittelt werden. Neben den Schwinggeschwindigkeiten werden über den Impedanzmesskopf auch Kraft und Beschleunigung am Anregungsort gemessen. Aus diesen Messdaten kann das Spektrum der Eingangsleistung bestimmt werden. Als Messgitter wird ein regelmäßiges Gitter von 43×33 Punkten verwendet. Die Gesamtanzahl der Messpunkte beträgt damit 1419. Die gemessenen Spektren der Eingangsleistungspegel und der ERP-Pegel sind links bzw. rechts in Abbildung 3.17 zu sehen.

Das Spektrum der Eingangsleistungspegel weist im Gegensatz zum Spektrum der ERP-Pegel zwischen den Resonanzen auch Antiresonanzen – Minima im Spektrum – auf. Die Antiresonanzen entsprechen den Eigenfrequenzen der Platte, wenn sie am Ort der Anregung in Anregungsrichtung fixiert

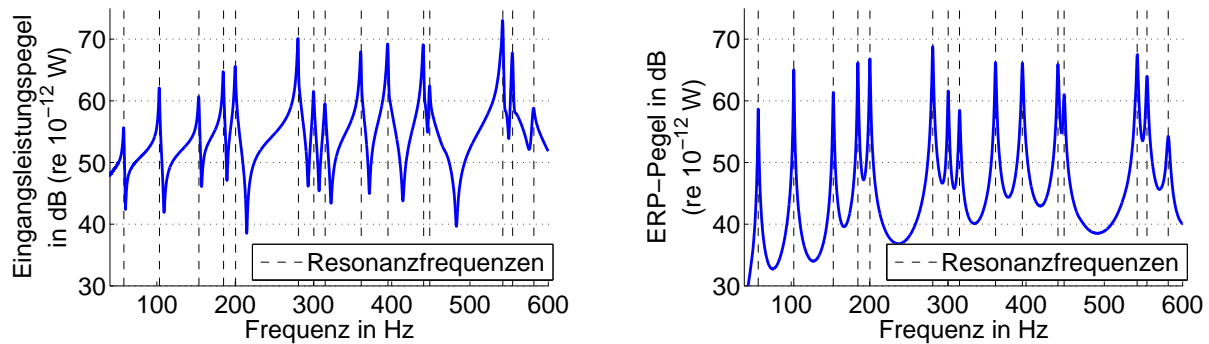


Abbildung 3.17: gemessene Spektren der Platte bei Anregung mit einem „periodic chirp“ von 40 bis 600 Hz; links: Eingangsleistungspegel, rechts: ERP-Pegel

wäre [64]. Dadurch kommt es an diesen Frequenzen zu einem Tilgungseffekt [65, S. 32] und die Kraftamplitude bricht ein, siehe Abbildung 3.18. Aufgrund des Krafteinbruchs sinkt auch die Schwinggeschwindigkeit und damit die Eingangsleistung, die sich aus Kraft und Schwinggeschwindigkeit am Kraftangriffsort bestimmt.

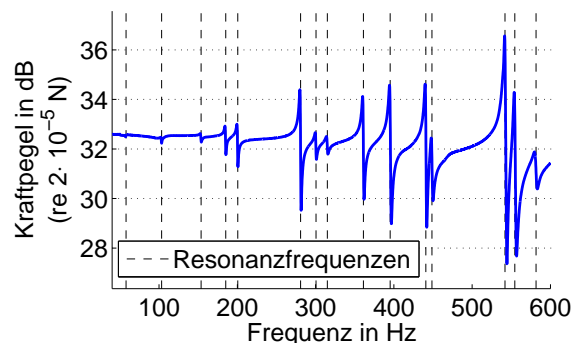


Abbildung 3.18: gemessenes Kraftpegelspektrum der Platte bei Anregung mit einem „periodic chirp“ von 40 bis 600 Hz

Im betrachteten Frequenzbereich liegen insgesamt 15 Resonanzfrequenzen. Die erste liegt bei 57,8 Hz und damit 22,6 % oberhalb der ersten Eigenfrequenz des numerischen Plattenmodells (47,14 Hz). Die weiteren Resonanzfrequenzen liegen dagegen nur noch 2,8–9,0 % oberhalb der entsprechenden Eigenfrequenzen der numerischen Platte. Die Tatsache, dass die Resonanzfrequenzen der experimentellen Platte höher als die Eigenfrequenzen der numerischen Platte sind, zeigt, dass die Lagerung nicht ideal gelenkig ist, sondern steifer ausfällt. Auch die zusätzliche Steifigkeit aufgrund der fixen Shakeranbindung wird zum Teil mitverantwortlich für die höheren Werte sein. Die Werte aller 15 Resonanzfrequenzen können Tabelle A.3 im Anhang entnommen werden.

In einem nächsten Schritt werden an diesen 15 Resonanzfrequenzen harmonische Analysen durchgeführt. Dabei wird über eine variable Verstärkung das Anregungssignal so angepasst, dass in allen Anregungsfrequenzen f_{AF_n} mit einer gleichen Kraftamplitude von 2 N angeregt wird. Die Kraftamplitude ist dabei so gewählt, dass die Platte in allen Anregungsfrequenzen f_{AF_n} zu einer (subjektiv empfunden) nennenswerten Plattenschwingung angeregt wird. Analog zu den numerischen Analysen werden im weiteren Verlauf der Arbeit diese n harmonischen Analysen, entsprechend der Reihenfolge des Auftretens der Resonanzfrequenzen, mit „Anregungsmoden“ n bezeichnet. Die Messungen zur ERP-Bestimmung liefern neben der ERP auch die zugehörigen Eingangsleistungen und Betriebsschwingformen der Anregungsmoden. Die Messdauer

$$t_{\text{mess}}(f_{\text{AF}_n}) = \frac{1}{f_{\text{AF}_n}} \cdot N_f(f_{\text{AF}_n}) \quad (3.3)$$

pro Messpunkt wird in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz f_{AF_n} so festgelegt, dass immer die gleiche Anzahl an Schwingspielen N_f erfasst wird. Für alle Messungen wird die Schwingspielanzahl zu $N_f = 100$ definiert und es werden drei Mittlungen pro Messpunkt durchgeführt. Mehr Schwingspiele oder mehr Mittlungen verbessern einerseits zwar die Messergebnisse, da kurze Störeinflüsse weniger ins Gewicht fallen, andererseits verlängern sie die gesamte Messdauer, sodass über der Zeit veränderliche Einflüsse wie Temperaturänderungen zunehmen.

Die gemessenen Pegel der Eingangsleistung und der ERP an den Resonanzfrequenzen bei harmonischer Anregung mit 2 N sind in Abbildung 3.19 zu sehen.

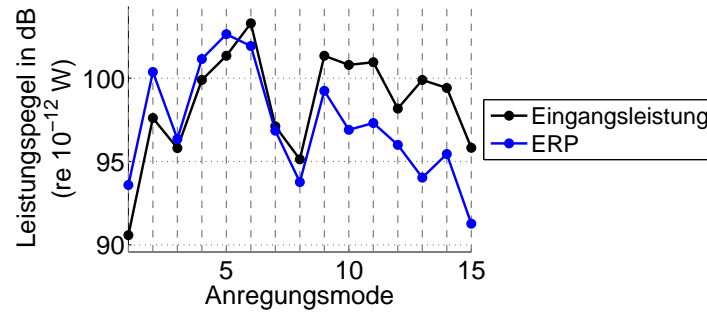


Abbildung 3.19: gemessene Spektren der Eingangsleistungspegel und der ERP-Pegel der Platte bei Anregung mit einem „periodic chirp“ von 40 bis 600 Hz

Die ERP-Pegel liegen für die ersten 5 Anregungsmoden 0,5–3,0 dB oberhalb der Eingangsleistungspegel und für die Anregungsmoden 6–15 zwischen 0,2 dB und 5,9 dB unterhalb der Eingangsleistungspegel. Hierin unterscheiden sich numerisches und experimentelles Plattenmodell, da im numerischen Modell die ERP-Pegel in allen Anregungsmoden deutlich oberhalb der Eingangsleistungspegel liegen. Das Verhalten des experimentellen Modells lässt sich durch die höhere Dämpfung der Struktur erklären. Denn beim experimentellen Plattenmodell erhöht sich, wie bereits erwähnt, die Dämpfung bedingt durch die Lagerung sehr stark, sodass Energie nicht nur aufgrund der Materialdämpfung dissipiert wird, sondern auch über die Lagerung „abfließen“ kann. Dass die Dämpfung im Vergleich zum numerischen Plattenmodell höher ist, zeigt sich beispielsweise auch an den Verhältniswerten des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit (siehe Abbildung 3.20), welche deutlich geringer ausfallen als beim numerischen Plattenmodell (Abbildung 3.8 bei $\eta = 0,0001$). Am numerischen Plattenmodell wurde gezeigt, dass im Falle einer rein reellen Kraftanregung sehr hohe Verhältniswerte des maximalen Real- und Imaginärteils nur bei sehr geringen Dämpfungen auftreten. Da in der Messung das Kraftsignal als Referenzsignal verwendet wird, auf das die Phase aller anderen Signale bezogen wird, weist die Kraft auch im Experiment eine rein reelle Amplitude auf.

Eine Betriebsschwingform ist, wie auch bei den numerischen Modellen, beispielhaft für die Anregungsmoden 3 in Abbildung 3.21 in Form von Real- und Imaginärteil ($V_{z,\text{re}}$, $V_{z,\text{im}}$) zu sehen. Ein Vergleich mit der Eigenschwingform erfolgt nicht, da diese im Rahmen dieser Arbeit keine Verwendung findet und daher messtechnisch nicht erfasst wird.

Der Realteil der Betriebsschwingform entspricht wie auch beim numerischen Plattenmodell (siehe Abbildung 3.7) der (1,2)-Schwingform. Der Imaginärteil der Betriebsschwingform ähnelt hingegen

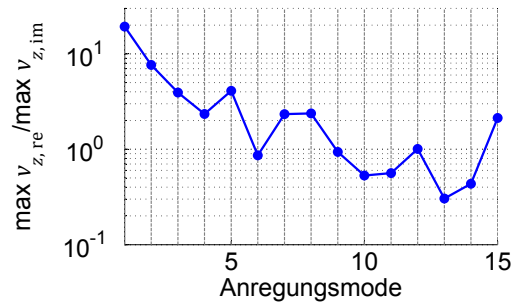


Abbildung 3.20: Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der gemessenen Geschwindigkeit \underline{v}_z über der Anregungsmodus n bei der Platte

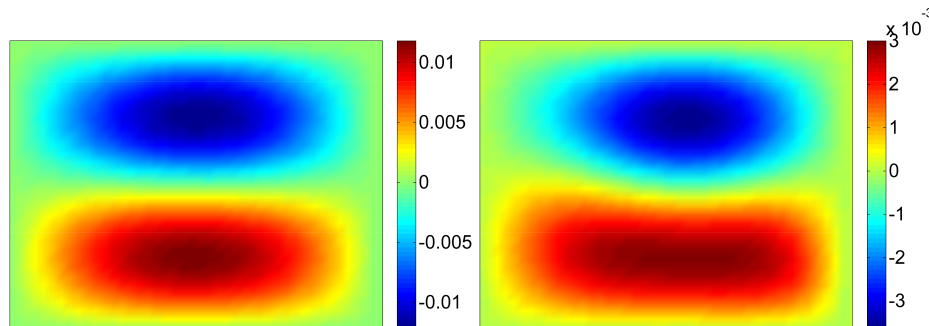


Abbildung 3.21: gemessene Betriebsschwingform ($V_{z, \text{re}}, V_{z, \text{im}}$) bei der Platte für die Anregungsmodus 3
links: Realteil $V_{z, \text{re}}$, rechts: Imaginärteil $V_{z, \text{im}}$

ebenfalls dem Realteil, worin sich das experimentelle und das numerische Plattenmodell unterscheiden. Bei der experimentell untersuchten Platte tritt dieses Verhalten in den meisten Anregungsmoden auf. Dieser Unterschied ist u. a. auf die höhere Dämpfung im experimentellen Modell zurückzuführen. Aufgrund der höheren Dämpfung steigen im Vergleich zum numerischen Plattenmodell nicht nur die Amplituden des Imaginärteils an, sondern dadurch bedingt ändert sich auch die Phaseninformation der Schwingform. Der Imaginärteil der Betriebsschwingform ähnelt in vielen Anregungsmoden der Schwingform des Realteils. Ein Vergleich der Betriebsschwingformen zwischen dem numerischen und dem experimentellen Modell zeigt zudem, dass im Experiment die Betriebsschwingform der numerischen Anregungsmodus 13, die (1,4)-Schwingform, nicht detektiert wird. Dies liegt vermutlich daran, dass die Anregung nahe einer Knotenlinie der (1,4)-Schwingform positioniert ist und diese daher nicht gut angeregt werden kann.

3.3 Voruntersuchung zur Eignung der äquivalent abgestrahlten Schallleistung als qualitative Bewertungsgröße von Modifikationen

Die äquivalent abgestrahlte Schallleistung P_{ERP} ist eine Vereinfachung der tatsächlich abgestrahlten Schallleistung P mit der Annahme eines konstanten Abstrahlgrades ($=1$) für alle Frequenzen (siehe Abschnitt 2.2). Für Frequenzen, in denen der Abstrahlgrad nicht dieser Annahme entspricht, liefert die ERP quantitativ andere Werte als die tatsächlich abgestrahlte Schallleistung. Ziel dieser Arbeit ist es allerdings nicht, die Schallabstrahlung einer Struktur quantitativ zu beziffern, sondern sie soll einen qualitativen Vergleich der Schallabstrahlung „verschiedener“ Modelle ermöglichen. Es sollen keine unterschiedlichen Strukturen, wie bspw. Platte und Gepäckraumboden, miteinander verglichen werden, sondern gleiche Strukturen, die sich durch lokal begrenzte Modifikationen unterscheiden. In Vorgängerarbeiten [66, 67] wird davon ausgegangen, dass sich ERP und tatsächlich abgestrahlte

Schallleistung einer Struktur in die gleiche Richtung ändern (sinken oder steigen), wenn die Struktur durch eine lokal begrenzte Modifikation verändert wird. In diesem Fall würden beide Größen für den beschriebenen Anwendungsfall eine gleiche Änderungstendenz aufweisen und die ERP wäre eine geeignete Größe, um die Änderung der Schallleistung aufgrund der Modifikation zu bewerten.

In dieser Voruntersuchung soll überprüft werden, ob die Annahme einer gleichen Änderungstendenz gültig ist. Dafür werden für eine Modellgruppe mit dem Namen „Platte mit Skin-Rippe“ ERP und tatsächlich abgestrahlte Schallleistung für die ersten 15 Anregungsmoden (siehe Abschnitt 3.1) bestimmt und miteinander verglichen. Bei der Modellgruppe handelt es sich um die Platte (siehe Abschnitt 3.2.1), die durch eine als Skin modellierte Rippe (siehe Abschnitt 3.2.2) modifiziert wird. Die Rippe wird dabei in ihrer Position ax_{Rip} , ay_{Rip} und Ausrichtung φ_{Rip} auf der Platte sowie in ihrer Länge l_{Rip} variiert. Breite b_{Rip} und Dicke h_{Rip} der Rippe bleiben konstant und betragen 25 bzw. 10 mm. Die Rippenparameter und ihre Werte können Abbildung 3.22 bzw. Tabelle 3.2 entnommen werden. Insgesamt beinhaltet die Modellgruppe 882 unterschiedliche Modelle.

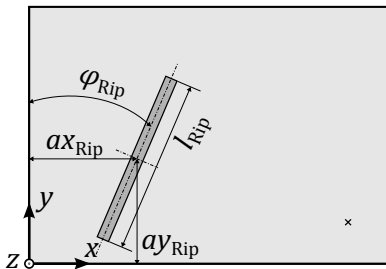


Abbildung 3.22: Modellparameter der Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“

Tabelle 3.2: Werte der Modellparameter der Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“

Parameter	Werte
ax_{Rip} in mm	160, 190, 200, 250, 280, 310, 340
ay_{Rip} in mm	160, 210, 260, 310, 360, 410, 460
φ_{Rip} in °	0, 30, 60, 90, 120, 150
l_{Rip} in mm	100, 200, 300

3.3.1 Aufbau der numerischen Luftschallmodelle

Für die numerische Berechnung der Schallleistung muss neben der Struktur auch die umgebende Luft berücksichtigt werden, die als Halbkugel mit dem Radius r_{Luft} modelliert wird, siehe Abbildung 3.23.

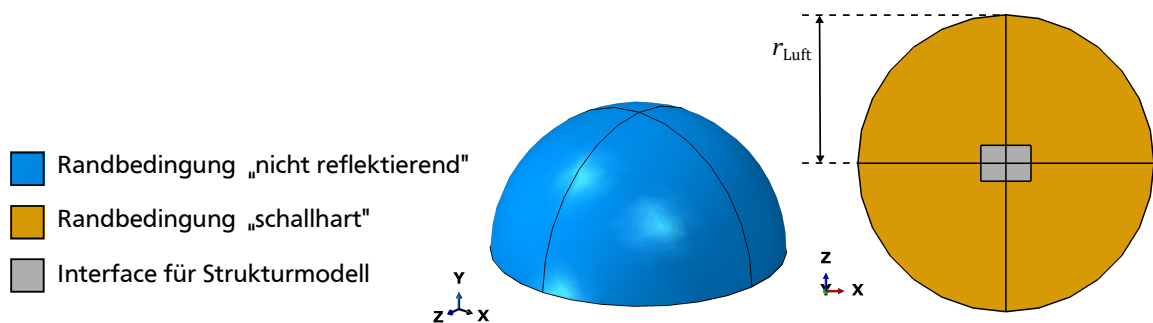


Abbildung 3.23: prinzipieller Aufbau des Luftschallmodells

Die Berechnungen der Struktur und der Luft erfolgen nacheinander in separaten Modellen, wobei die „sequentially coupled acoustic-structural analysis“ in ABAQUS genutzt wird [62, Kap. 6.10]. Dabei greift das Submodell der Luft auf das referenzierte globale Modell der Struktur als Anregung zurück. Für die Kopplung von Submodell und globalem Modell wird im Submodell der Bereich, in dem die Plattenstruktur positioniert wäre, als Interface für das globale Strukturmodell definiert. Die sequenzielle Modellierung von Struktur und Luft senkt den numerischen Aufwand und kann in Anwendungsfällen verwendet werden, in denen die Rückkopplung der Luft auf die Struktur vernach-

lässigbar gering ist. Im vorliegenden Fall ist dies gegeben, da es sich um eine Abstrahlung ins Freifeld handelt. Um nicht das gesamte Freifeld modellieren zu müssen – was rechnerisch auch nicht möglich wäre –, wird das Freifeld als Halbkugel modelliert, die an den radialen Außenflächen mit der Randbedingung „nicht reflektierend“ versehen wird. Die ebene Unterseite der Lufthalbkugel erhält die Randbedingung „schallhart“. Dadurch wirkt die Unterseite der Lufthalbkugel wie eine Spiegelfläche, sodass die gesamte Schallabstrahlung der Struktur in alle Raumrichtungen – wie es auch bei einer Modellierung der Luft als vollständige Kugel der Fall wäre – berechnet werden kann. Dies ist notwendig, um die gesamte Schallleistung der Struktur zu bestimmen. Die Reduktion der Luftmodellierung von einer Kugel auf eine Halbkugel mit einer schallharten Unterseite ist möglich, da die Schallabstrahlung der Platte nach oben und unten symmetrisch ist.

Die Luft wird mit quadratischen Tetraederelementen (AC3D10) [62, Kap. 28.1] mit einer variierenden Kantenlänge vernetzt. Für das Interface für das Strukturmodell werden lineare Dreieckselemente (ASI3D3) [62, Kap. 32.13], deren Schenkel eine Kantenlänge von 10 mm haben, gewählt. Die Vernetzung der Luft weist im Interface-Bereich die gleiche Elementgröße wie das Interface selbst auf und wird von dort ausgehend in die radiale Richtung gröber. Die maximale Kantenlänge der Tetraederelemente wird – ebenso wie der Radius des Luftmodells – in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz definiert. Dabei wird die maximale Kantenlänge so gewählt, dass mindestens 8 Elemente pro Wellenlänge vorhanden sind. Je höher die Anregungsfrequenz f_{AF_n} ist, desto kleiner ist die zugehörige Wellenlänge $\lambda(f_{AF_n})$ und desto kleiner muss auch die Kantenlänge $l_E(f_{AF_n})$ der Elemente sein

$$l_E(f_{AF_n}) = \frac{\lambda(f_{AF_n})}{8} = \frac{c}{8f_{AF_n}}, \quad (3.4)$$

um der Vorgabe von mindestens 8 Elementen pro Wellenlänge zu entsprechen. Die Wahl von 8 Elementen pro Wellenlänge ist durch eine Abwägung zwischen Genauigkeit und numerischem Aufwand⁶ begründet. Eine höhere Wahl von 10 Elementen pro Wellenlänge würde im Ergebnis nur eine vernachlässigbar kleine Änderung der Schallleistung bewirken (Abbildung A.8 im Anhang), gleichzeitig aber einen deutlichen Anstieg der Elementanzahl verursachen (Abbildung A.9 im Anhang).

Der Radius der Lufthalbkugel wird, wie bereits erwähnt, ebenfalls in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz definiert. Damit soll gewährleistet sein, dass die radiale Außenfläche der Lufthalbkugel, welche der Hüllfläche S entspricht, über welche zur Bestimmung der Schallleistung gemäß Gleichung (2.10) integriert wird, immer im gleichen Schallfeld liegt. Das Schallfeld einer ins Freifeld abstrahlenden Struktur unterteilt sich in ein Nah- und ein Fernfeld. Die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld ist nicht genau definiert, sondern der Übergang zwischen beiden Schallfeldern ist fließend, abhängig von der Struktur und in jedem Fall abhängig von der Frequenz. Für schallabstrahlende Strukturen, die sich wie ein Monopolstrahler verhalten, gilt

$$kr_{Luft} \gg 1 \quad (3.5)$$

als Fernfeldbedingung. Darin entspricht k der Wellenzahl. Die Platte ist zwar kein Monopolstrahler, aber mit zunehmendem kr_{Luft} wird auch bei der Platte ein konstantes kr_{Luft} dafür sorgen, dass die radiale Außenfläche der Halbkugel für alle Anregungsfrequenzen in einem ähnlichen Schallfeld liegt,

⁶ Die Berechnung der Schallleistung für die ersten 15 Anregungsmoden dauert bei den gewählten Einstellungen für den Radius und die Vernetzung ca. 3 Stunden pro Modell – bei einer Verwendung von 24 Rechnerkernen.

da sich die Platte dann zunehmend einem Monopolstrahler annähert. Der Radius wird so gewählt, dass für jede Anregungsfrequenz $kr_{\text{Luft}} = 10$ gilt. Zum so berechneten Radius wird anschließend die halbe Plattenlänge $l_x/2$ addiert, damit der minimale Abstand zwischen Struktur und Außenfläche der Halbkugel einem Abstand von $kr_{\text{Luft}} = 10$ entspricht. Je höher die Anregungsfrequenz f_{AF_n} ist, desto größer ist auch die Wellenzahl $k(f_{\text{AF}_n})$. Daher kann der Radius

$$r_{\text{Luft}}(f_{\text{AF}_n}) = \frac{10}{k(f_{\text{AF}_n})} + \frac{l_x}{2} = \frac{10\lambda(f_{\text{AF}_n})}{2\pi} + \frac{l_x}{2} = \frac{10c}{2\pi f_{\text{AF}_n}} + \frac{l_x}{2} \quad (3.6)$$

mit zunehmender Frequenz kleiner gewählt werden. Dies ist hilfreich, um den numerischen Aufwand für alle Frequenzen in einem akzeptablen Rahmen zu halten, da umgekehrt, wie bereits beschrieben, auch die Kantenlänge mit zunehmender Frequenz kleiner gewählt werden muss. Die Wahl von $kr_{\text{Luft}} = 10$ ist ebenfalls durch eine Abwägung zwischen Genauigkeit und numerischem Aufwand begründet. Ein Vergleich mit der Schallleistung der einfachen Platte für verschiedene kr_{Luft} zeigt zum einen, dass die Genauigkeit der Ergebnisse mit dem Radius ansteigt (Konvergenz der Werte mit steigendem kr). Der Vergleich zeigt zum anderen aber auch, dass die Änderung in der Schallleistung durch eine noch höhere Wahl des Radius als $kr_{\text{Luft}} = 10$ nicht so groß ist (Abbildung A.10 im Anhang), dass sie den deutlich höheren Aufwand aufgrund der größeren Elementanzahl rechtfertigt (Abbildung A.11 im Anhang). Insgesamt ist bei den betrachteten Variationen der Einfluss des Luftradius auf die Schallleistung größer als der Einfluss der Elementanzahl pro Wellenlänge.

3.3.2 Vergleich der Änderungen von ERP und Schallleistung aufgrund von Modifikationen

Der Vergleich von ERP und Schallleistung erfolgt u. a. über die Bestimmung der linearen Korrelation K nach Bravais-Pearson. Die lineare Korrelation K zweier Größen \vec{x}, \vec{y} wird demnach bestimmt über

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{arith}})(y_i - y_{\text{arith}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{arith}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{\text{arith}})^2}} \quad \text{mit } x_{\text{arith}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \text{ und } y_{\text{arith}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.7)$$

wobei x_i und y_i den Werten des i -ten Modells entsprechen [68, S. 74].

In Abbildung 3.24 sind für die Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“ die Werte der Schallleistung denen der ERP für die ersten 15 Anregungsmoden gegenübergestellt. Die linke Darstellung enthält die lineare Gegenüberstellung beider Größen in W, die rechte Darstellung zeigt die entsprechenden Pegelgrößen in dB. Jeder Punkt entspricht den Werten eines Modells (insgesamt sind es 882 Modelle) für die jeweilige Anregungsmode. In der Legende ist für jede Anregungsmode die Korrelation zwischen den beiden Größen angegeben; dabei handelt es sich um die Korrelation der linearen Größen.

Der Wertebereich, in dem sich Schallleistung und ERP der einzelnen Modelle ändern, variiert stark mit der Anregungsmode. Die Korrelation zwischen beiden Größen liegt für 9 der 15 Anregungsmoden oberhalb von $K \geq 0,9$, was als sehr gut zu bewerten ist. In den Anregungsmoden 4, 7 und 15 ist die Korrelation mit Werten zwischen 0,78 und 0,86 immer noch als gut anzusehen. Nur in den Anregungsmoden 6, 9 und 10 korrelieren Schallleistung und ERP nicht miteinander, da die Korrelation nur Werte zwischen 0,45 und 0,5 erreicht. Eine hohe Korrelation beider Größen ist für die Eignung der ERP als qualitative Bewertungsgröße von Modifikationen allerdings nicht notwendig. Dafür ist,

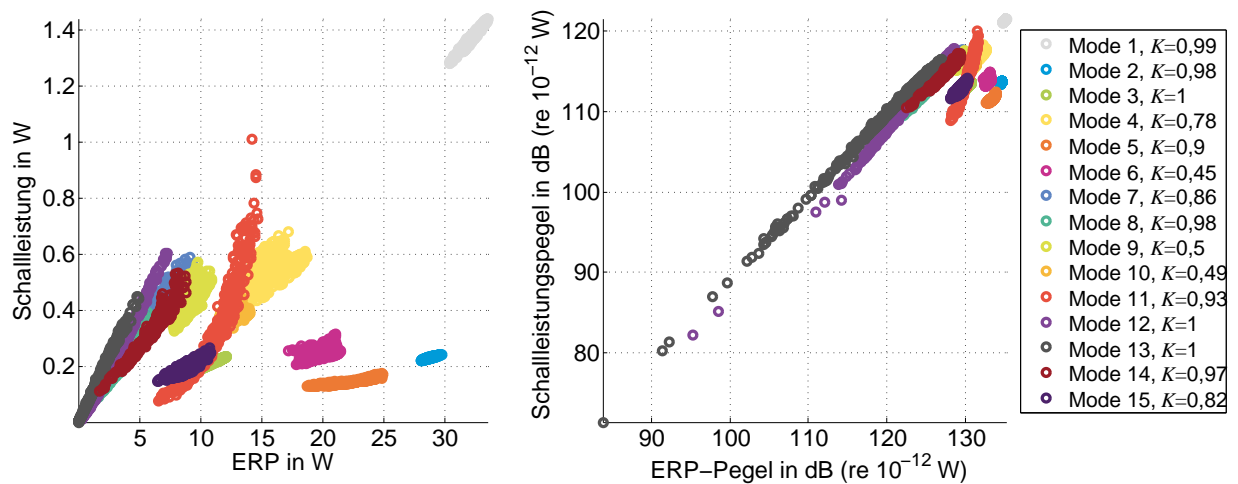


Abbildung 3.24: Vergleich von Schallleistung und ERP für die Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“; links: Leistungen in W, rechts: Leistungspegel in dB

wie bereits beschrieben, eine gleiche Änderungstendenz beider Größen ausreichend. Zur Darstellung der Änderungstendenz werden sowohl für die Schallleistung als auch für die ERP die Pegeldifferenzen zwischen den Pegeln der Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“ und den jeweiligen Pegeln der einfachen Platte ohne Rippe bestimmt, siehe Abbildung 3.25. Die rechte Darstellung entspricht einem vergrößerten Ausschnitt der linken Darstellung um den Punkt (0, 0). Die grauen Linien bei den Pegeldifferenzen von Null dienen als visuelle Referenz.

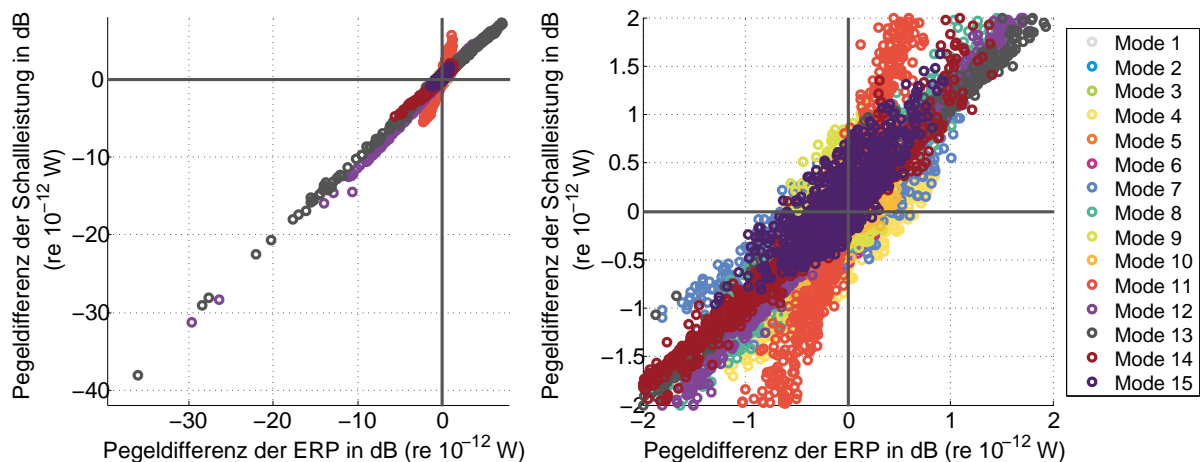


Abbildung 3.25: Pegeldifferenz von Schallleistung und ERP zwischen der Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“ und der einfachen Platte; links: Pegeldifferenzen in dB, rechts: Ausschnitt der Pegeldifferenzen in dB um den Punkt (0, 0)

Bezogen auf die einfache Platte weisen alle Modelle der Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“, die im 1. oder 3. Quadranten liegen, eine gleiche Änderungstendenz für die Schallleistung und die ERP auf, weil die Pegeldifferenzen beider Größen dort positiv bzw. negativ sind. Anhand des vergrößerten Ausschnitts (Abbildung 3.25 rechts) kann die Änderungstendenz beider Größen besser analysiert werden. Die Mehrheit der Modelle liegt im 1. oder 3. Quadranten. Alle Modelle, die dagegen im 2. oder 4. Quadranten liegen, weisen verhältnismäßig kleine Pegeldifferenzen von Schallleistung und ERP ($\pm 0,8$ dB) bezüglich der unmodifizierten Platte auf, da ihre Werte dicht am Ursprung liegen. Die numerische Genauigkeit der Schallleistungsberechnung liegt – gemessen an den Pegelunterschieden der Schallleistung bei den Radien 5 m, 10 m und 15 m der Lufthalbkugel (siehe Abbildung A.10 im An-

hang) – bei $\pm 0,4$ dB. Dieser Wert stammt aus Schalleistungsuntersuchungen an der Platte ohne Rippe, die ein regelmäßiges FE-Netz besitzt. Bei den Modellen der Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“ ist das Netz aufgrund der Rippe nicht mehr regelmäßig, das Interface im Luftmodell jedoch schon. Daher ist davon auszugehen, dass die numerische Genauigkeit der Schalleistung bei diesen Modellen etwas schlechter ist. Dennoch kann daraus nicht eindeutig geschlossen werden, dass sich die Modelle im 2. und 4. Quadranten nur aufgrund numerischer Fehler dort befinden. Keines der Modelle im 2. oder 4. Quadranten weist allerdings ein entgegengesetztes Verhalten von Schalleistung und ERP bei gleichzeitig großen Pegeldifferenzen auf. Aus diesem Grund kann zusammenfassend geschlossen werden, dass die ERP geeignet ist zu bewerten, wie sich die Schallabstrahlung einer Struktur aufgrund einer kleinen Modifikation verändert, solange die verursachte Änderung der ERP-Pegel ausreichend groß ist. Die Grenze für eine ausreichend große Änderung der ERP-Pegel wird für diese Arbeit anhand der Ergebnisse auf $|\Delta P_{\text{ERP}}| \geq 1$ dB gesetzt.

4 Untersuchungen zur Entwicklung von Modifikationsregeln anhand der Strukturintensität

Die Strukturintensität ist eine Strukturgröße, die bereits genutzt und analysiert wird (siehe Kapitel 1), um Anhaltspunkte zu erhalten, wo Strukturmodifikationen zu platzieren sind, um dadurch die Schallabstrahlung zu reduzieren [23, S. 94 ff.], [53]. In diesen Arbeiten erfolgt die Platzierung der Modifikationen durch eine STI-Analyse des Anwenders. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Analyse der STI und damit die Lage der Modifikationen rechnerisch durchzuführen bzw. zu bestimmen, sodass eine Automatisierung der Strukturanpassung möglich wird.

Die Frage, die sich im Rahmen der STI-Analyse stellt, ist, was den Energiefluss in Modellen mit einer geringen Schallabstrahlung vom Energiefluss in Modellen mit einer höheren Schallabstrahlung unterscheidet. Die Kenntnis von Zusammenhängen zwischen STI und Schallabstrahlung stellt die Basis dar, um STI-basierte Modifikationsregeln abzuleiten. Die Schallabstrahlung wird in dieser Arbeit durch die ERP, eine skalare Größe, beschrieben (siehe Abschnitt 2.2). Die STI hingegen ist ein Vektorfeld. Um Zusammenhänge zwischen zwei Größen zu ermitteln und eine Korrelationsbewertung durchführen zu können, sind gleiche Eingangsgrößen erforderlich. Dementsprechend ist es nötig, skalare Kenngrößen aufzustellen, mit denen die STI-Vektorfelder charakterisiert werden können, um Zusammenhänge zwischen STI und ERP zu ermitteln und damit eine rechnerische STI-Analyse zu ermöglichen. Über die Beschreibung der Vektorfelder durch skalare Kenngrößen kann die Informationsdichte, die das Vektorfeld besitzt, reduziert und handhabbar gemacht werden. Die Kenngrößen ermöglichen sowohl den direkten, quantitativen Vergleich der STI zwischen verschiedenen Modellen als auch den Vergleich der STI mit der Schallabstrahlung – hier der ERP – für das gleiche Modell. Sind über die Analyse der skalaren Kenngrößen Korrelationen mit der ERP gefunden, ist es der nächste Schritt, anhand der Zusammenführung dieser Erkenntnisse mit Forschungsergebnissen aus der Literatur Modifikationsregeln aufzustellen und zu überprüfen.

4.1 Analyse skalarer Kenngrößen zur Charakterisierung der STI-Vektorfelder

Zunächst soll anhand des visuellen Vergleichs zweier STI-Vektorfelder die Notwendigkeit und auch Möglichkeit skalarer Kenngrößen für eine Bewertung der Unterschiede veranschaulicht werden. Abbildung 4.1 zeigt den STI-Verlauf (Flussdichte und -richtung) von zwei unterschiedlich modifizierten Plattenmodellen, die beide in ihrer 10. Eigenfrequenz angeregt werden (siehe Abschnitt 3.1 für die Analysemethode und Abschnitt 3.2 für die Informationen zum Plattenmodell). Die Modelle A (links) und B (rechts) unterscheiden sich nur in der Position einer elementgroßen Skin mit der Masse von 1 kg (ca. 4,7 % der Plattenmasse), die als graues Quadrat eingezeichnet ist.

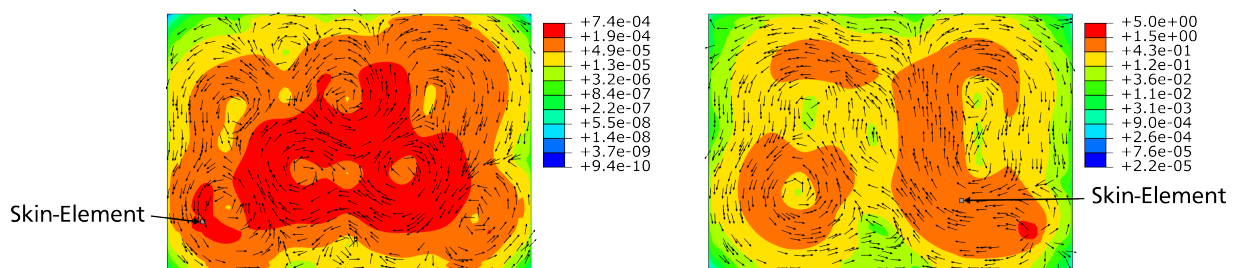


Abbildung 4.1: Vergleich der STI-Verläufe in zwei unterschiedlich modifizierten Plattenmodellen bei gleicher Anregungsmoden (10. Eigenfrequenz), links: Modell A, rechts: Modell B

Die Berechnung der ERP von beiden Modellen für die Anregungsmode 10 ergibt, dass die ERP von Modell B um 58 dB höher ist als die ERP von Modell A. Der quantitative Vergleich der STI zeigt, dass auch das Maximum der Flussdichte (Maximum der jeweiligen Legenden) von Modell B um 4 Größenordnungen höher ist. Auch der visuelle, qualitative Vergleich beider STI-Verläufe zeigt, dass klare Unterschiede vorhanden sind. Beispielsweise weist der Energiefluss von Modell A mehr Wirbel auf und die Energiemenge – bezogen auf das jeweilige Maximum – sinkt ausgehend vom Ort der Kraftanregung langsamer ab (größere Bereiche sind rot eingefärbt). Diese sichtbaren Unterschiede sowie auch weitere Unterschiede können durch die Definition geeigneter skalarer Kenngrößen rechnerisch quantifizierbar gemacht werden.

4.1.1 Definition STI-basierter skalarer Kenngrößen

Die Reduktion der Informationen eines STI-Vektorfeldes in STI-basierte skalare Kenngrößen erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden aus dem Vektorfeld Skalarfelder abgeleitet. Anschließend werden konkrete Kenngrößen definiert, die sich anhand einzelner Skalarfelder berechnen lassen.

Die Informationen eines STI-Vektorfeldes lassen sich zunächst aufteilen in das Skalarfeld der Flussdichte (FD-Skalarfeld) und das Skalarfeld der Flussrichtung (FR-Skalarfeld), siehe Abbildung 4.2.

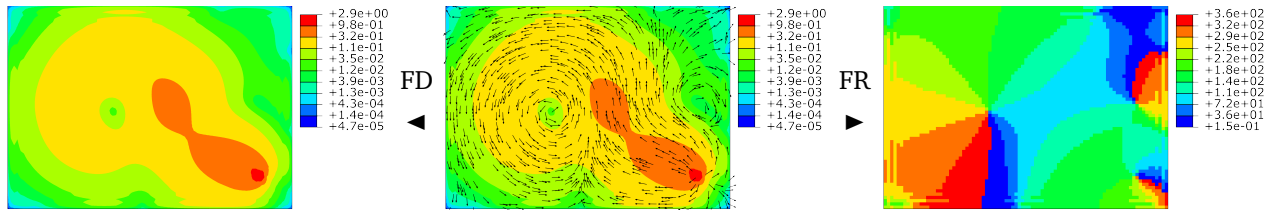


Abbildung 4.2: Aufteilung des STI-Vektorfeldes in die Skalarfelder Flussdichte FD (links) und Flussrichtung FR (rechts)

Die Flussdichte FD wird gemäß Gleichung (2.8) bestimmt, die Flussrichtung FR über den Winkel zwischen einem definierten Referenzvektor $\vec{I}_{S',a,ref}$ und dem STI-Vektor $\vec{I}_{S',a}$

$$FR = \angle(\vec{I}_{S',a,ref}, \vec{I}_{S',a}) = \begin{cases} \arccos\left(\frac{\vec{I}_{S',a,ref} \cdot \vec{I}_{S',a}}{|\vec{I}_{S',a,ref}| |\vec{I}_{S',a}|}\right) & \text{für } \text{sgn}(I_{S',a,ref,y}) = \text{sgn}(I_{S',a,y}) \\ 360^\circ - \arccos\left(\frac{\vec{I}_{S',a,ref} \cdot \vec{I}_{S',a}}{|\vec{I}_{S',a,ref}| |\vec{I}_{S',a}|}\right) & \text{für } \text{sgn}(I_{S',a,ref,y}) \neq \text{sgn}(I_{S',a,y}) \end{cases} \quad (4.1)$$

Der Flussrichtung in Abbildung 4.2 liegt der Referenzvektor $\vec{I}_{S',a,ref} = [1, 0]$ zugrunde. Die Wahl des Referenzvektors hat keinen Einfluss auf das qualitative Ergebnis der Flussrichtung, lediglich die Zahlenwerte und damit die farbliche Ausgestaltung ändern sich.

Weiterhin kann die STI in verschiedene Anteile zerlegt werden, was am Beispiel der STI-Komponente in x-Richtung gezeigt wird

$$\underline{I}_{S',x} = \underbrace{\underline{N}_x \underline{v}_x^*}_{\text{IP-Anteil}} + \underbrace{\underline{N}_{xy} \underline{v}_y^* + \underline{M}_x \underline{\dot{\varphi}}_y^* - \underline{M}_{xy} \underline{\dot{\varphi}}_x^* + \underline{Q}_x \underline{v}_z^*}_{\text{OOP-Anteil}} \quad (4.2)$$

Darin stehen zunächst IP und OOP für den In-plane- bzw. Out-of-plane-Anteil der STI. Der IP-Anteil der STI enthält die Energieausbreitung von Wellen, deren Schwingungsrichtung in der Plattenebene liegt. Der OOP-Anteil hingegen beschreibt die Energieausbreitung von Wellen, deren Schwingungs-

richtung aus der Plattenebene heraus zeigt. Der OOP-Anteil lässt sich nochmals unterteilen und einzelnen Schnittgrößen zuordnen. Der BM-, TM- und Q-Anteil stehen demnach für den Biegemoment-, den Torsionsmoment- bzw. den Querkraft-Anteil der STI. Für jeden dieser STI-Anteile können eigene FD- und FR-Skalarfelder bestimmt werden.

Des Weiteren können auch normierte Varianten der Skalarfelder erzeugt werden, sodass nur Werte zwischen 0 und 1 vorkommen. Eine Normierung der FR-Skalarfelder liefert allerdings keine neuen Informationen, da die Flussrichtung aller Modelle bereits den gleichen Wertebereich (0–360°) aufweist. Durch eine Normierung der FD-Skalarfelder bleibt die qualitative Verteilung der Flussdichte erhalten – dafür werden quantitative Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen eliminiert, sodass in einem späteren Vergleich der Kenngrößen der normierten FD-Skalarfelder mit der ERP oder anderen Kenngrößen rein qualitative Zusammenhänge identifiziert werden können.

Die beschriebenen Skalarfelder lauten zusammengefasst

- FD, FD_{IP} , FD_{OOP} , FD_{BM} , FD_{TM} , FD_Q ,
- FR, (FR_{IP} , FR_{OOP} , FR_{BM} , FR_{TM} , FR_Q ,)
- FD_{norm} , $FD_{IP,norm}$, $FD_{OOP,norm}$, $FD_{BM,norm}$, $FD_{TM,norm}$, $FD_{Q,norm}$.

Die in Klammer stehenden FR-Skalarfelder werden im Rahmen dieser Arbeit allerdings gar nicht erstellt und untersucht, da im nächsten Schritt der Definition skalarer Kenngrößen für die verschiedenen Skalarfelder keine Kenngrößen für diese FR-Skalarfelder aufgestellt werden können, bei denen die zu erwartende Aussagekraft in einem vertretbaren Verhältnis zum Berechnungsaufwand steht.

Für das unnormierte FR-Skalarfeld wird

- die Anzahl der Wirbel N_{Wirbel} ,

als skalare Kenngröße definiert.⁷ Der in dieser Arbeit implementierte Algorithmus zur Bestimmung der Wirbelanzahl erfordert die Interpolation der FR-Werte auf ein regelmäßiges Gitter. In diesem wird dann nach Gruppen benachbarter Elemente gesucht, die aufgrund ihrer FR-Werte auf einen Wirbel hinweisen. Im Zentrum eines Wirbels fließt die Energie im Kreis, sodass vier benachbarte, in einem Quadrat angeordnete Elemente FR-Werte aufweisen, die ungefähr 90° auseinander liegen.

Bei den skalaren Kenngrößen, die für alle FD-Skalarfelder definiert werden, handelt es sich um

- die maximale Flussdichte FD_{max} ,
- die minimale Flussdichte FD_{min} ,
- die flächengewichtet aufsummierte Flussdichte FD_{sum} ,
- die flächengewichtet quadratisch aufsummierte Flussdichte FD_{sum}^2 ,
- den Median der Flussdichte FD_{med} ,
- den arithmetischer Mittelwert der Flussdichte FD_{arith} ,
- die Standardabweichung der Flussdichte FD_{σ} ,
- die Schiefe der Flussdichte $FD_{Schiefe}$,

⁷ Für das unnormierte FR-Skalarfeld sind auch weitere Kenngrößen untersucht worden, die auf der Verteilung und Gruppierung der FR-Werte basieren, wie beispielsweise die mittlere oder maximale Größe zusammenhängender Flächen gleicher FR-Wert-Gruppen oder die Anzahl solcher zusammenhängender Flächen pro FR-Wert-Gruppe. Da diese Kenngrößen gar keine Korrelation zur ERP aufweisen, werden sie der besseren Übersichtlichkeit halber nicht näher beschrieben und ausgewertet.

- den arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt $FD_{F,arith}$,
- die Differenz zwischen dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt $\Delta FD_{F,arith-arith}$,
- den prozentualen Flächenanteil bezogen auf ein $Y\sigma$ -Streuband um den Median der Flussdichte $A_{Y\sigma,FD_{med}}$ für $Y \in \{1; 0,5\}$
- den prozentualen Flussdichteanteil bezogen auf ein $Y\sigma$ -Streuband um den Median der Flussdichte $FD_{Y\sigma,FD_{med}}$ für $Y \in \{1; 0,5\}$ und
- den prozentualen Flächenanteil bezogen auf das Maximum der Flussdichte $A_{ZFD_{max}}$ für $Z \in \{0,1; 0,5; 0,25; 0,001\}$.

Die Berechnungsvorschriften dieser skalaren Kenngrößen sind in Tabelle A.4 im Anhang zu finden. Neben der flächengewichtet aufsummierten Flussdichte FD_{sum} wird auch die flächengewichtet quadratisch aufsummierte Flussdichte FD_{sum}^2 gebildet, da Korrelationen mit der ERP untersucht werden sollen und für die Berechnung der ERP die Schwinggeschwindigkeiten quadratisch aufsummiert werden. Die Flussdichten und quadratischen Flussdichten werden flächengewichtet aufsummiert, um den Umstand zu berücksichtigen, dass nicht alle Elemente gleich groß sein müssen und somit die einzelnen Flussdichten unterschiedlich große Flächenbereiche repräsentieren können. Haben in einem Modell alle Elemente die gleiche Größe, ändert die Flächengewichtung die FD -Werte nicht. Der arithmetische Mittelwert der Flussdichte $FD_{F,arith}$ wird untersucht, um den Energieeintrag am Ort der Kraftanregung, unabhängig von der maximalen Flussdichte, untersuchen zu können. Beim $Y\sigma$ -Streuband der Kenngrößen $A_{Y\sigma,FD_{med}}$ und $FD_{Y\sigma,FD_{med}}$ handelt es sich um die Selektion aller Elemente, deren Flussdichte um maximal $Y \cdot FD_{\sigma}$ größer oder kleiner als der Median der Flussdichte ist. Beim prozentualen Flächenanteil bezogen auf das Maximum der Flussdichte $A_{ZFD_{max}}$ werden alle Elemente selektiert, die eine Flussdichte von mindestens $Z \cdot FD_{max}$ besitzen. Die beiden Kenngrößen FD_{min} und FD_{max} sind nur für die unnormierten FD -Skalarfelder sinnvoll, da sie bei den normierten FD -Skalarfeldern konstant sind (0 bzw. 1) und damit nicht für eine Differenzierung verschiedener STI-Vektorfelder geeignet sind.

4.1.2 Gruppierung und Auswahl STI-basierter skalarer Kenngrößen

Die skalaren Kenngrößen werden miteinander verglichen, um einerseits ähnliche Kenngrößen zu identifizieren und diese in Korrelationsgruppen zusammenzufassen und andererseits redundante Kenngrößen zu verwerfen.

Alle Kenngrößen werden für die ersten 15 Anregungsmoden der Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“ (siehe Abbildung 3.22) bestimmt. Anschließend wird zur Gruppierung und Auswahl der skalaren Kenngrößen die lineare Korrelation K nach Bravais-Pearson der skalaren Kenngrößen untereinander für jede Anregungsmoden gemäß Gleichung (3.7) bestimmt. Aus den Korrelationswerten aller Anregungsmoden werden dann der Korrelationsmittelwert K_{arith} und die Korrelationsstandardabweichung K_{std} ermittelt. Der mögliche Wertebereich der Korrelation K liegt zwischen -1 und 1 . Eine vollständige Redundanz zweier Kenngrößen liegt bei einem Korrelationsmittelwert $K_{arith} = 1$ vor. Ein solcher Wert ist aufgrund numerischer Ungenauigkeiten nicht zu erwarten. Daher ist eine Grenze zu definieren, ab der zwei Kenngrößen als redundant angesehen werden und somit eine von beiden verworfen

werden kann. Diese Grenze wird zu $K_{arith} \geq 0,98$ gewählt, da dieser Wert noch sehr nahe an Eins liegt, aber kleinere Ungenauigkeiten zulässt. Ebenso ist zu definieren, ab welchem Wert der Korrelation die Kenngrößen als ähnlich angesehen und in eine Korrelationsgruppe zusammengefasst werden können. Diese Grenze wird auf $K_{arith} \geq 0,8$ gelegt, da 0,8 häufig als untere Grenze einer noch sehr hohen Korrelation angesehen wird [69].

Zunächst wird die Korrelation der Kenngrößen untereinander für die gesamte STI und pro STI-Anteil betrachtet. Der IP-Anteil der STI ist in der betrachteten Modellgruppe aufgrund der Anregungsrichtung Null, weswegen der OOP-Anteil identisch mit der gesamten STI ist. Damit verbleiben neben der gesamten STI die STI-Anteile BM, TM und Q. Die Auswertung zeigt, dass das Korrelationsverhalten der Kenngrößen untereinander für die gesamte STI und die drei STI-Anteile zwischen den meisten Kenngrößen ähnlich ist. Aus diesem Grund wird die Auswertung der Kenngrößen lediglich für die beiden FD-Skalarfelder FD und FD_{norm} der gesamten STI durchgeführt. Eine vollständige Übersicht der Korrelationsmittelwerte K_{arith} und Korrelationsstandardabweichungen K_{std} für die gesamte STI ist in Abbildung A.12 im Anhang zu finden.

Tabelle 4.1 zeigt die Ergebnisübersicht der Korrelationsauswertung. Mittels \leftrightarrow sind darin diejenigen Größen gekennzeichnet, welche als redundant angesehen werden können. Die Fettschrift gibt an, welche Kenngrößen für die weitere Analyse ausgewählt werden.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Korrelationsauswertung der skalaren Kenngrößen untereinander;
 \leftrightarrow = Redundanz, **Fettschrift** = Auswahl

Korrelationsgruppe	korrelierende skalare Kenngrößen
-	$FD_{Schiefe}$ \leftrightarrow $FD_{norm,Schiefe}$
-	$A_{Y\sigma,FD_{med}}$ \leftrightarrow $A_{Y\sigma,FD_{norm,med}}$
-	$FD_{Y\sigma,FD_{med}}$ \leftrightarrow $FD_{Y\sigma,FD_{norm,med}}$
-	$A_{ZFD_{max}}$ \leftrightarrow $A_{Z,FD_{norm,max}}$
1	FD_{max}, FD_{σ}, $FD_{F,arith}$, $\Delta FD_{F,arith-arith}$
2	FD_{arith}, FD_{med}
3	FD_{arith}, FD_{σ}, FD_{sum}, FD_{sum}^2
4	$FD_{norm,arith}$, $FD_{norm,\sigma}$, $FD_{norm,sum}$, $FD_{norm,sum}^2$, $FD_{norm,med}$
5	$\Delta FD_{F,arith-arith}$, $\Delta FD_{F,norm,arith-norm,arith}$
6	$A_{0,1FD_{max}}$, $A_{0,1FD_{norm,max}}$, $FD_{norm,arith}$, $FD_{norm,\sigma}$, $FD_{norm,sum}$, $FD_{norm,sum}^2$
7	$A_{0,01FD_{max}}$, $A_{0,01FD_{norm,max}}$, $FD_{norm,med}$

Die vier Kenngrößen $FD_{Schiefe}$, $A_{Y\sigma,FD_{med}}$, $FD_{Y\sigma,FD_{med}}$ und $A_{ZFD_{max}}$ korrelieren zwischen den normierten und unnormierten Skalarfeldern jeweils sehr stark miteinander und sind gemäß der gesetzten Grenze als redundant anzusehen. Da diese Kenngrößen keine quantitative, sondern nur eine qualitative Aussage über die Verteilung der Flussdichte machen, war dieses Verhalten zu erwarten. Ausgewählt werden jeweils die Kenngrößen des unnormierten Skalarfeldes.

Es können 7 Korrelationsgruppen erstellt werden. Innerhalb einer Korrelationsgruppe korrelieren alle Kenngrößen untereinander. In den Korrelationsgruppen 1–3 fällt auf, dass die beiden Kenngrößen

FD_{arith} und FD_{σ} je zweimal vertreten sind. Beide Kenngrößen weisen somit Eigenschaften auf, die sie ähnlich zu den jeweils anderen Kenngrößen in den beiden Korrelationsgruppen machen. Die anderen Kenngrößen beider Gruppen wiederum sind untereinander aber doch so verschieden, dass keine große gemeinsame Korrelationsgruppe entstanden ist. Im Fall der normierten FD-Skalarfelder bilden die Kenngrößen der Korrelationsgruppen 2 und 3 die gemeinsame Korrelationsgruppe 4. Weiterhin bildet die Kenngröße $\Delta FD_{F,arith-arith}$ der normierten und unnormierten FD-Skalarfelder die 5. Korrelationsgruppe. Es werden alle Kenngrößen der einzelnen Korrelationsgruppen, mit Ausnahme redundanter Kenngrößen, wie im Falle der Korrelationsgruppen 6 und 7, für die weiteren Analysen ausgewählt.

Die beiden Kenngrößen FD_{min} und N_{Wirbel} werden ebenfalls für die weitere Analyse selektiert, da sie mit keiner anderen Kenngröße korrelieren und somit eine eigenständige Differenzierung der STI-Vektorfelder ermöglichen.

4.1.3 Korrelation der STI-basierten, skalaren Kenngrößen mit der ERP

Die verbliebenen STI-basierten, skalaren Kenngrößen werden nun mit der ERP korreliert, um mögliche Zusammenhänge zwischen der ERP und der STI zu ermitteln⁸. Die Korrelation wird dabei für jede Anregungsmoden analog zur Korrelation zwischen den Kenngrößen gemäß Gleichung (3.7) bestimmt. Anschließend werden auch hier der Mittelwert und die Standardabweichung der Korrelationswerte aller Anregungsmoden K_{arith} und K_{std} bestimmt. Die Darstellung der Korrelationsmittelwerte und -standardabweichungen zwischen den skalaren Kenngrößen und der ERP ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Die Werte sind dabei absteigend anhand der Korrelationsmittelwerte sortiert. Die vertikalen roten Linien bei den Korrelationsmittelwerten $-0,8$ und $0,8$ markieren die in Abschnitt 4.1.2 definierten Grenzen, ab welchen die Korrelation als hoch anzusehen ist.

Die beiden skalaren Kenngrößen $\Delta FD_{arith-F,arith}$ und $FD_{F,arith}$ korrelieren am stärksten ($K_{arith} \approx 0,93$) mit der ERP. Die Korrelation zwischen FD_{max} und ERP fällt mit $K_{arith} = 0,85$ etwas geringer aus. Der Unterschied in der Korrelation von $FD_{F,arith}$ und FD_{max} mit der ERP deutet daraufhin, dass in den untersuchten Modellen das Maximum der Flussdichte nicht oder nicht immer am Ort der Kraftanregung liegt. Wäre dies der Fall, so wären die Korrelationsmittelwerte beider Kenngrößen mit der ERP ähnlicher zueinander. Dass das Flussdichtemaximum nicht immer am Ort der Kraftanregung liegen muss, ist im linken STI-Beispiel in Abbildung 4.1 ersichtlich. Die dennoch hohe Korrelation aller drei Kenngrößen mit der ERP zeigt, dass sie ein ähnliches Verhalten wie die ERP aufweisen. Diese hohen Korrelationen bedeuten, dass mit einem steigenden Energieeintrag am Ort der Kraftanregung und auch mit einem generell steigenden Energieniveau – gemessen an der maximalen Flussdichte – eine Struktur lauter wird. Diese Erkenntnis war zu erwarten, da die Skin-Rippe die Dämpfung nur in minimaler Weise beeinflusst und die gesamte zugeführte Leistung dissipiert oder abgestrahlt werden muss (siehe Abschnitt 2.3). Die hohe Korrelation zwischen $\Delta FD_{arith-F,arith}$ und der ERP bedeutet, dass bei lauterer Strukturen auch die Diskrepanz zwischen Flussdichte am Anregungsort und der im Mittel in der Struktur vorliegenden Flussdichte wächst. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Optimierungsergebnissen von ROTHE und LANGER [38], die zeigen, dass bei ihrer leisesten Struktur die

⁸ Eine Korrelation zwischen STI-basierten, skalaren Kenngrößen und der ERP eines Strukturbereichs A wird von SCHAAL ET AL. [66, 67] untersucht. Sie zeigen, dass der Energiefluss über die Grenzlinien des Strukturbereichs A mit der ERP dieses Strukturbereichs korreliert.

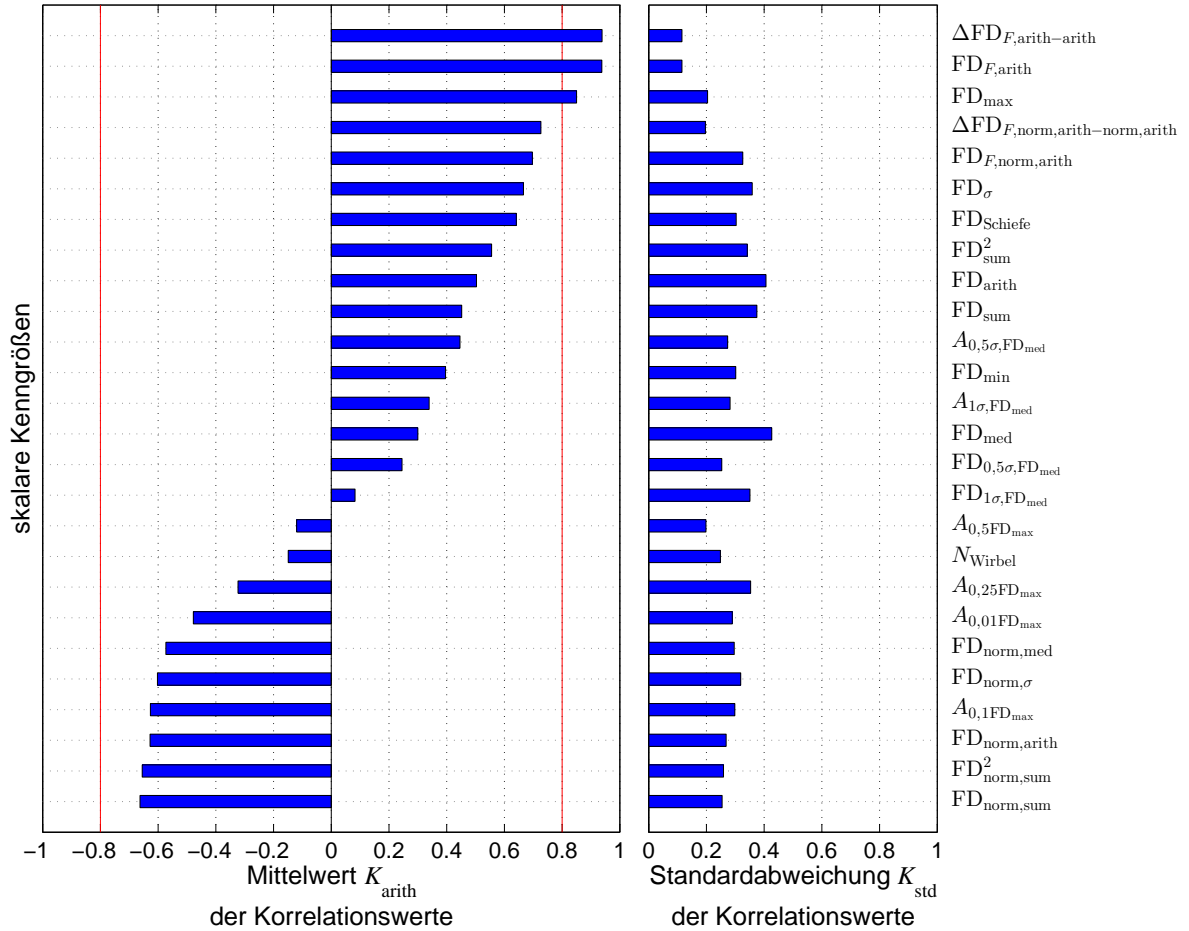


Abbildung 4.3: Korrelation zwischen skalaren Kenngrößen und der ERP in Form von Mittelwert K_{arith} und Standardabweichung K_{std} der Korrelationswerte aller Anregungsmoden

Energieverteilung in der Struktur am deutlichsten als homogen bezeichnet werden kann. Vier weitere Kenngrößen weisen eine mittlere Korrelation mit der ERP im Bereich von $0,6 \leq K_{arith} \leq 0,8$, bei einer gleichzeitigen Standardabweichung der Korrelationswerte im Bereich von $0,2 \leq K_{std} \leq 0,36$, auf. Eine so hohe Standardabweichung im Vergleich zum Mittelwert weist daraufhin, dass die Korrelation dieser Kenngrößen und der ERP in einigen Moden deutlich höher liegen muss und einige andere Moden dagegen eine sehr geringe Korrelation aufweisen. Einige Kenngrößen, wie beispielsweise FD_{min} , weisen keinerlei Zusammenhang mit der ERP auf, da ihr mittlerer Korrelationswert im Bereich $-0,4 \leq K_{arith} \leq 0,4$ liegt. Negative Korrelationswerte bedeuten, dass sich Kenngröße und ERP gegenläufig verhalten. Ein ideal gegenläufiges Verhalten zweier Größen läge bei $K_{arith} = -1$ vor. Fünf der untersuchten Kenngrößen weisen negative Korrelationsmittelwerte von $-0,7 \leq K_{arith} \leq -0,6$ bei einer Standardabweichung von $0,25 \leq K_{std} \leq 0,32$ auf. Die Korrelation zwischen diesen Kenngrößen und der ERP muss daher für einige Anregungsmoden zwischen $-1 \leq K_{arith} \leq -0,8$ liegen.

Die Kenngrößen der Korrelationsgruppen 1–3 und 5 weisen alle positive Korrelationsmittelwerte größer 0,45 und die Kenngrößen der Korrelationsgruppen 4, 6 und 7 negative Werte kleiner $-0,47$ auf. Die beiden Korrelationswerte K_{arith} und K_{std} lassen allerdings keine Aussage darüber zu, ob die Ursachen dafür, dass die Korrelationsmittelwerte zwischen 0,45 und 1 bzw. $-0,47$ und -1 liegen, bei allen Kenngrößen einer Korrelationsgruppe gleich sind oder nicht. So können beispielsweise niedrige Korrelationswerte in gleichen oder verschiedenen Anregungsmoden zu einer Absenkung des

Korrelationsmittelwertes zwischen der jeweiligen Kenngröße und der ERP führen. Daher wird eine detaillierte Gegenüberstellung der Kenngrößen und der ERP für alle Anregungsmoden analysiert. Exemplarisch dafür ist in den Abbildungen 4.4–4.8 die ERP über den Kenngrößen FD_{\max} , $\Delta FD_{F,\text{arith}}-\text{arith}$, $FD_{F,\text{arith}}$, FD_{arith} bzw. $FD_{\text{arith,norm}}$ für alle Anregungsmoden zu sehen. Die Darstellung erfolgt jeweils sowohl in linearer (links) als auch doppeltlogarithmischer Darstellung (rechts). Die doppeltlogarithmische Darstellung erfolgt in Form von Pegelgrößen. Jeder Punkt entspricht dabei den Größenwerten eines Modells in der farblich entsprechenden Anregungsmode. Die Korrelation K zwischen den Kenngrößen und der ERP (es werden jeweils die linearen Werte für die Berechnung verwendet) ist für jede Anregungsmode in der Legende angegeben.

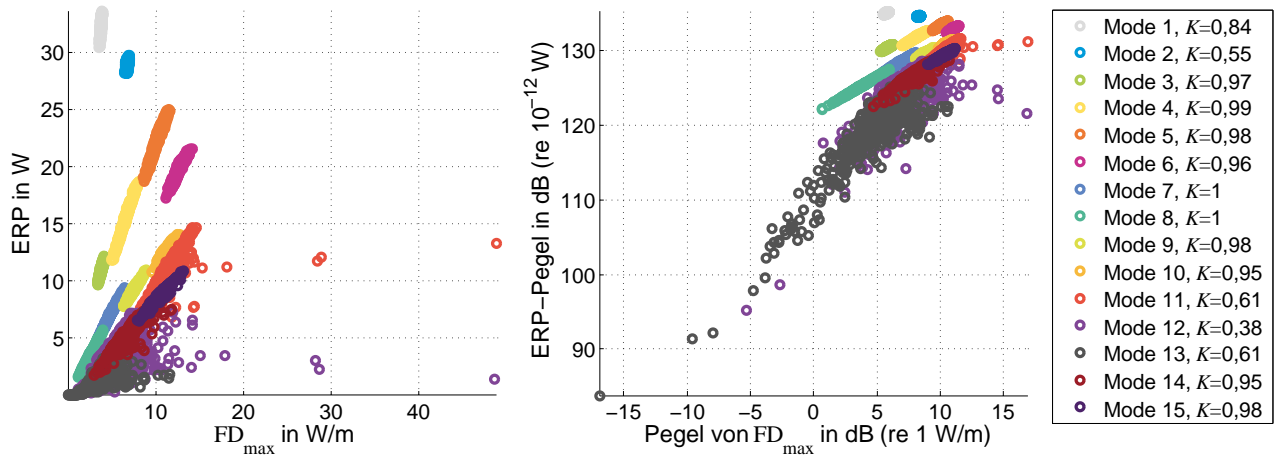


Abbildung 4.4: Gegenüberstellung der ERP und der maximalen Flussdichte FD_{\max}

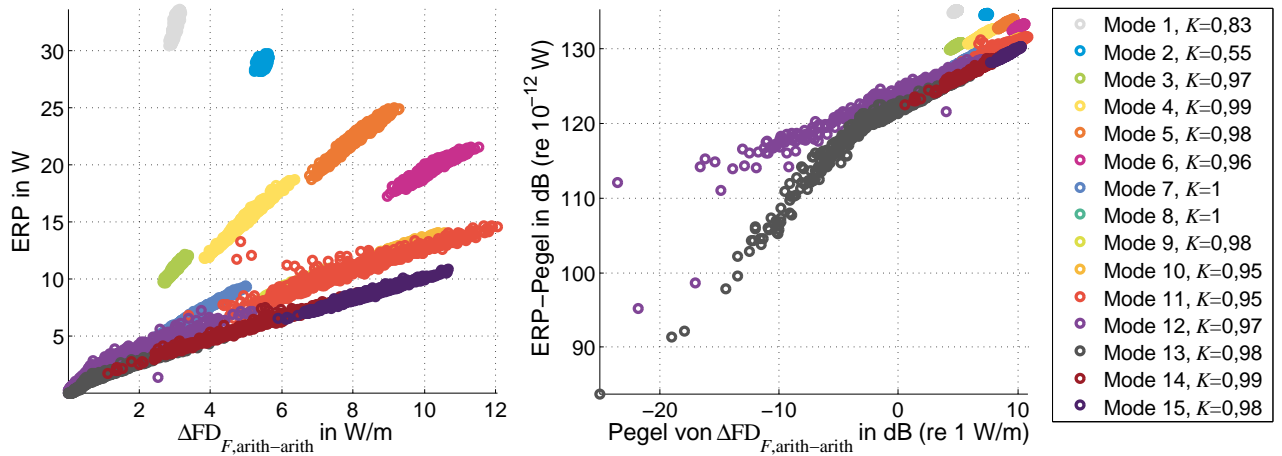


Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der ERP und der Differenz zwischen dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt $\Delta FD_{F,\text{arith}}-\text{arith}$

Die beiden Kenngrößen FD_{\max} und $\Delta FD_{F,\text{arith}}-\text{arith}$ korrelieren beide sehr stark mit der ERP und gehören zudem in die gleiche Korrelationsgruppe. Der Vergleich der Korrelationswerte der einzelnen Anregungsmoden zeigt, dass beide Kenngrößen in den Anregungsmoden 1–10 und 15 eine (nahezu) gleiche Korrelation mit der ERP aufweisen. Beide korrelieren beispielsweise schlecht in der Anregungsmode 2 mit der ERP ($K(f_{AF_2}) = 0,55$) oder sehr gut in den Moden 7 und 8 ($K(f_{AF_{7/8}}) = 1$). Der Unterschied im Korrelationsmittelwert beider Größen beruht somit einzig darauf, dass FD_{\max} in den Anregungsmoden 11–14 schlechter abschneidet und größere Streuungen der Werte zwischen den ein-

zelen Modellen aufweist. Diese Streuungen sind in Abbildung 4.4 anhand einzelner Ausreißerpunkte erkennbar. Dagegen zeigt die Betrachtung der Korrelationswerte für die einzelnen Anregungsmoden der Kenngrößen $FD_{F,arith}$ (Abbildung 4.6) und $\Delta FD_{F,arith-arith}$ (Abbildung 4.5), dass sie zum einen nahezu identisch sind und zum anderen keine so deutlichen Ausreißerpunkte aufweisen.

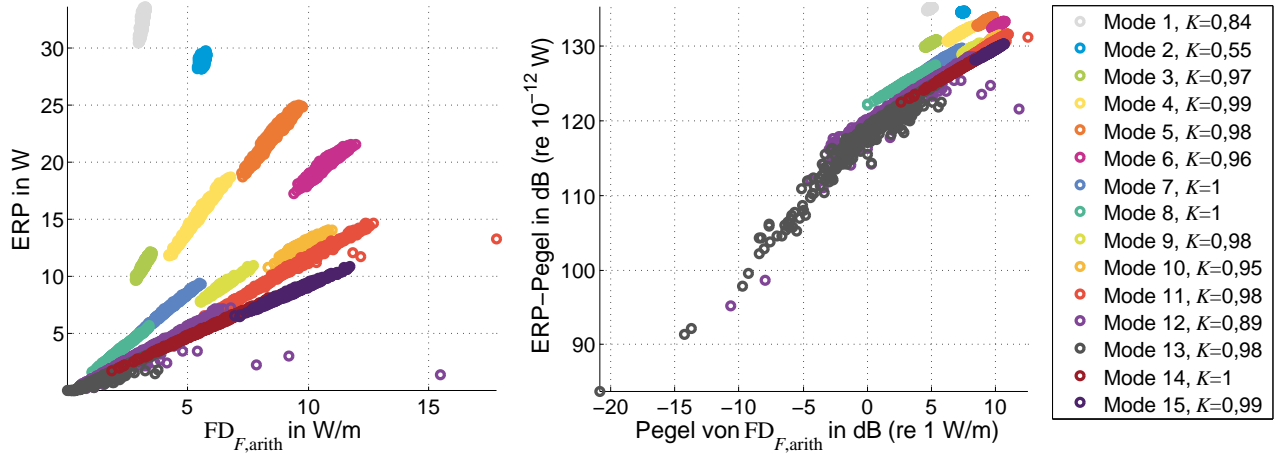


Abbildung 4.6: Gegenüberstellung der ERP und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt $FD_{F,arith}$

Dies spricht dafür, dass das Maximum der Flussdichte in den „Ausreißermodellen“ in Abbildung 4.4 nicht am Ort der Kraftanregung liegt, denn dann müssten diese Ausreißer auch in Abbildung 4.6 bei der Kenngröße $FD_{F,arith}$ auftauchen.

Bei der Kenngröße FD_{arith} (Abbildung 4.7), die in eine andere Korrelationsgruppe als die drei Kenngrößen FD_{max} , $\Delta FD_{F,arith-arith}$ und $FD_{F,arith}$ gehört, variieren die Korrelationswerte zwischen den Anregungsmoden sehr deutlich. In einigen Anregungsmoden ist die Korrelation zur ERP extrem hoch $K(f_{AF_3}) = 0,99$, in anderen dagegen kann von keinerlei Korrelation gesprochen werden $K(f_{AF_6}) = -0,05$. Interessant ist, dass in der Anregungsmode 2, in der sowohl FD_{max} als auch $\Delta FD_{F,arith-arith}$ schlecht mit der ERP korreliert haben, die Korrelation zwischen FD_{arith} und der ERP einen hohen Wert von $K(f_{AF_2}) = 0,88$ erreicht.

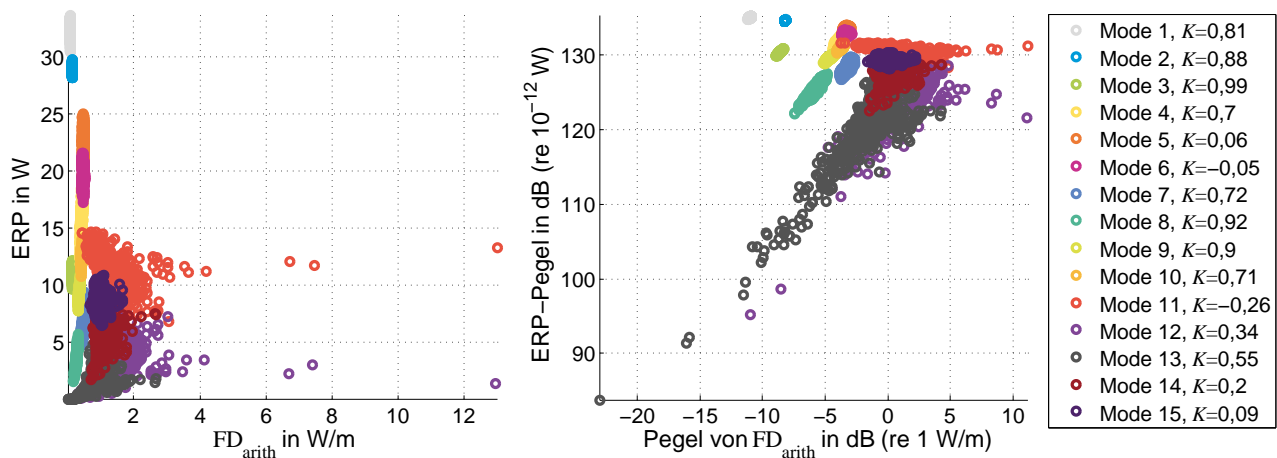


Abbildung 4.7: Gegenüberstellung der ERP und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte FD_{arith}

Der weitere Vergleich zwischen den beiden Kenngrößen FD_{arith} (Abbildung 4.7) und $FD_{norm,arith}$ (Abbildung 4.8) zeigt, dass sie ein völlig unterschiedliches Verhalten aufweisen. Während FD_{arith} mit

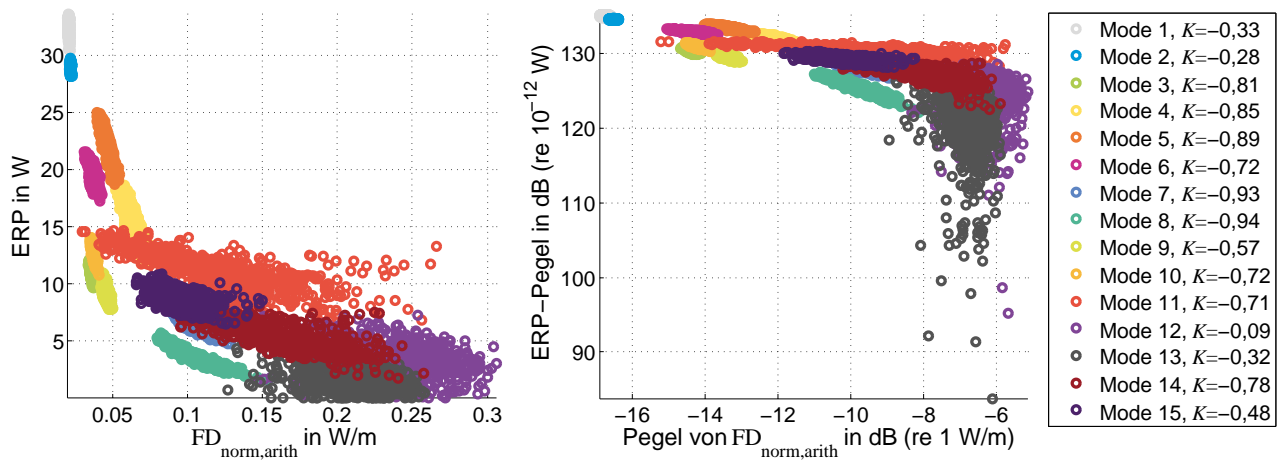


Abbildung 4.8: Gegenüberstellung der ERP und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der normierten FD-Skalarfelder $FD_{arith,norm}$

steigender ERP tendenziell ebenfalls steigt, sinken die Werte von $FD_{norm,arith}$, was aufgrund der negativen Korrelationswerte auch zu erwarten ist. Quantitativ betrachtet sind somit Modelle mit einem höheren Mittelwert der Flussdichte lauter. Dieses Verhalten ist plausibel, da auch die maximale Flussdichte mit der ERP korreliert und die maximale Flussdichte in den Mittelwert eingeht – eine höhere maximale Flussdichte führt auch zu einem höheren Mittelwert. Wird die STI-Verteilung dagegen rein qualitativ betrachtet, so sind Modelle umso lauter, je niedriger das arithmetische Mittel der Flussdichte ist. Anschaulich gesehen bedeutet dies, dass Modelle umso lauter sind, je kleiner Bereiche hoher Flussdichten im Verhältnis zu den Bereichen kleinerer Flussdichten sind. Kleine Bereiche hoher Flussdichten gehen einher mit einem starken Werteabfall der Flussdichte zu den umliegenden Strukturbereichen. Dieses Verhalten passt zur bereits beschriebenen Eigenschaft, dass bei lauterer Strukturen die Diskrepanz zwischen Flussdichte am Anregungsort und der im Mittel in der Struktur vorliegenden Flussdichte wächst.

In Abbildung 4.9 ist abschließend zusammengefasst, für welche Anregungsmoden die einzelnen skalaren Kenngrößen eine hohe positive ($K \geq 0,8$, rot) oder negative ($K \leq -0,8$, blau) Korrelation mit der ERP aufweisen. Die Reihenfolge der Kenngrößen erfolgt dabei von links nach rechts anhand von aufsteigenden Korrelationsmittelwerten. Oberhalb der Übersicht sind die Nummern der jeweiligen Korrelationsgruppen angegeben. Zum einen ist ersichtlich, dass für jede Anregungsmoden mindestens zwei Kenngrößen – meist sind es mehr – einen hohen Korrelationswert mit der ERP aufweisen. Zum anderen gibt es keine Kenngröße, die sowohl einen hohen positiven als auch hohen negativen Korrelationswert mit der ERP und damit ein widersprüchliches Verhalten zwischen verschiedenen Anregungsmoden aufweist. Weiterhin ist erkennbar, dass Kenngrößen einer Korrelationsgruppe – hauptsächlich Korrelationsgruppen, deren Kenngrößen eine hohe positive Korrelation zur ERP besitzen – diese hohen Korrelationswerte nicht in exakt den gleichen, sondern in verschiedenen Anregungsmoden aufweisen. Beispielhaft hierfür können FD_{arith} und FD_{sum}^2 betrachtet werden, die in der gleichen Korrelationsgruppe sind, aber in ihrer Korrelation zur ERP pro Anregungsmoden Unterschiede aufweisen.

Abschließend lässt sich aus Abbildung 4.9 festhalten, dass die drei Kenngrößen $\Delta FD_{F,arith-arith}$, $FD_{F,arith}$ und FD_{max} als alleinige Kenngrößen in fast allen Moden stark mit der ERP korrelieren. In Anregungs-

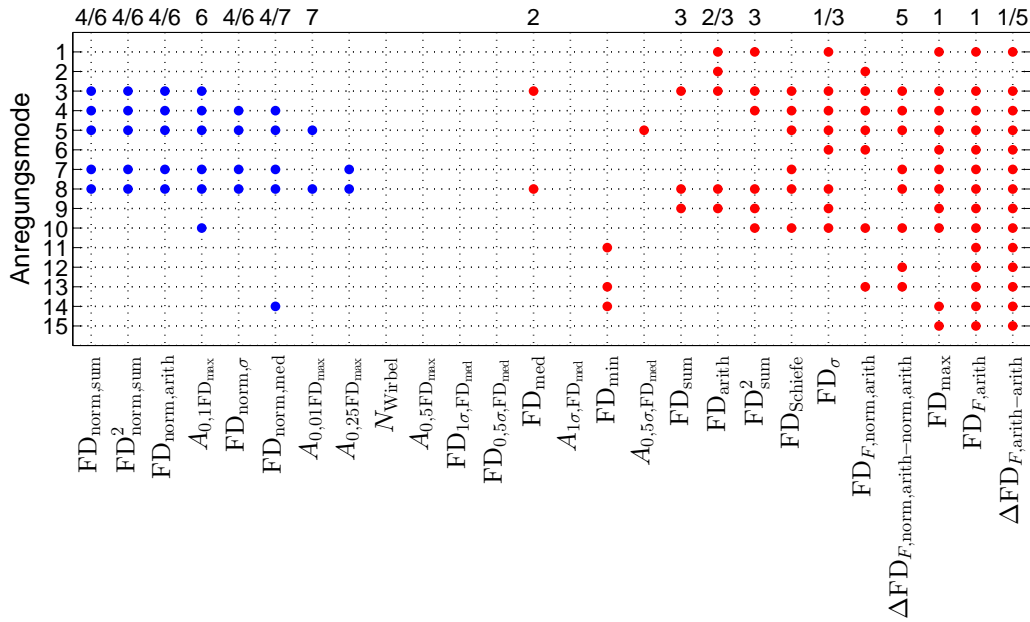


Abbildung 4.9: Übersicht hoher Korrelationswerte der skalaren Kenngrößen pro Anregungsmodus; rot: $K \geq 0,8$, blau: $K \leq -0,8$

mode 2, in denen keine dieser drei Kenngrößen eine Korrelation zur ERP aufweist, ist die Änderung in der ERP, die durch die unterschiedlichen Modelle bewirkt wird, sehr klein, was daran erkennbar ist, dass die Punkte aller Modelle dicht beieinander liegen. Die Wertespanne aller ERP-Pegel beträgt dort nur circa 0,25 dB. Anders sieht es dagegen in den Moden 12 und 13 aus, in denen die verschiedenen Modelle zu ERP-Pegeln in einer Wertespanne von 33,4 dB bzw. 43,2 dB führen. Dort erreicht die skalare Kenngröße FD_{\max} nur Korrelationswerte von $K = 0,38$ bzw. $K = 0,61$. In diesen beiden Moden steigen die Korrelationswerte dafür deutlich an, wenn sie für die Pegelgrößen statt für die linearen Größen bestimmt werden. So werden sogar Werte von $K_{\text{dB}} = 0,7$ bzw. $K_{\text{dB}} = 0,88$ für die Anregungsmoden 12 bzw. 13 erreicht. Dieses Verhalten ist durch das Zusammentreffen von zwei Eigenschaften begründet. Die erste Eigenschaft ist der große Wertebereich, den die verschiedenen Modelle aufspannen. Die zweite Eigenschaft ist, dass gerade bei den Modellen mit einer niedrigen ERP, die einen Großteil des Wertebereichs verursachen, auch die maximale Flussdichte entsprechend niedrig ist und mit der ERP korreliert. Die logarithmische Darstellung „entzerrt“ die Modellunterschiede im niedrigen Wertebereich, sodass eine dortige Korrelation die gesamte Korrelation dominiert.

Die hohen Korrelationen zwischen STI-basierten Kenngrößen und der ERP gelten zudem nicht nur für die Platte. Beispielhaft dafür ist die Kenngröße $FD_{F,\text{arith}}$ in Abbildung 4.10 auch für modifizierte Gepäckraumbodenmodelle der ERP gegenübergestellt. Dabei handelt es sich um 108 unterschiedliche Gepäckraumbodenmodelle (siehe Abschnitt 3.2.1), bei denen jeweils zufällig auf einem Element eine Skin mit einer Masse von 1 kg aufgebracht ist.

Auch beim Gepäckraumboden können für diese Kenngröße sehr hohe Korrelationen festgestellt werden. Auch bei allen anderen Kenngrößen zeigt sich beim Gepäckraumboden ein ähnliches Bild wie bei der Platte. Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass die an der Platte getroffenen Aussagen nicht nur auch für den Gepäckraumboden, sondern auch für weitere dünnwandige Strukturen gelten. Diese hohen Korrelationen einiger STI-basierter Kenngrößen mit der ERP zeigen – sowohl bei der

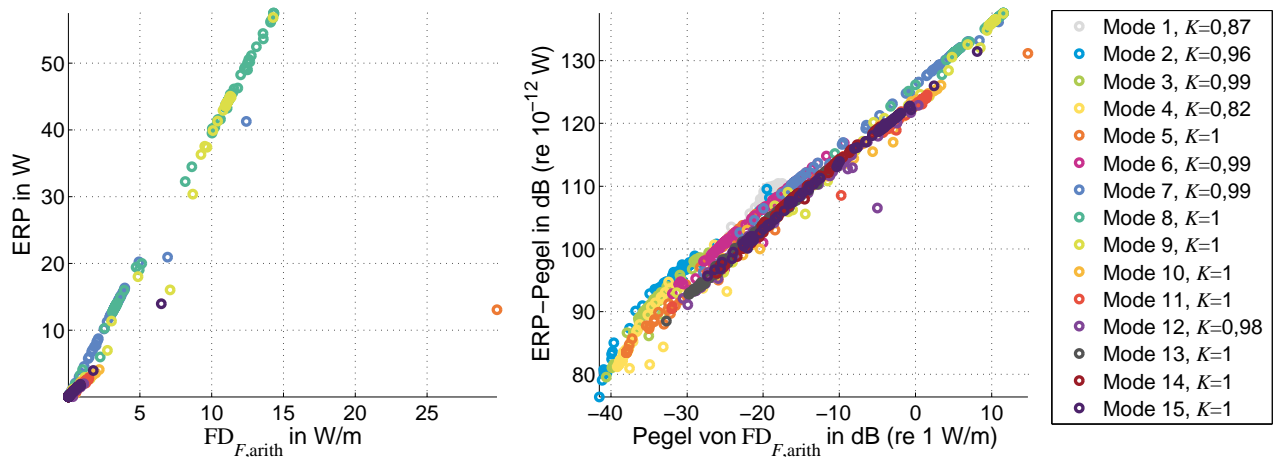


Abbildung 4.10: Gegenüberstellung von ERP und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt für den Gepäckraumboden $FD_{F,arith}$

Platte als auch einer komplexeren Struktur wie dem Gepäckraumboden –, dass die Schalleistung verschiedener modifizierter Strukturen anhand der STI vergleichend bewertet werden kann. Ein Beispiel hierzu, in dem die Eingruppierung von Modellen in die Gruppen „laut“, „mittel“ und „leise“ vorgestellt wird, ist in [70] veröffentlicht. Da die Kenngrößen ein unterschiedliches Korrelationsverhalten mit der ERP aufweisen, ist es möglich, dass eine Kombination der Informationen die Treffsicherheit in der Bewertung im Vergleich zur alleinigen Betrachtung einer Kenngröße erhöht. Eine solche Analyse erscheint interessant, ist für die Analysen in dieser Arbeit allerdings nicht von Belang.

4.2 Positionierung von Modifikationen auf Basis der STI

Auf Basis der Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen der STI und der ERP aus Abschnitt 4.1 und Forschungsergebnissen aus der Literatur sollen Modifikationsregeln aufgestellt werden. Das Zusammenführen beider Informationsquellen führt zwar nicht zu mehreren, aber zu einer viel versprechenden Hypothese für eine STI-basierte Modifikationsregel, die vorgestellt und überprüft wird.

4.2.1 Aufstellen einer Hypothese für eine STI-basierte Modifikationsregel

Die beiden STI-basierten skalaren Kenngrößen FD_{max} und $FD_{F,arith}$ gehören zu den drei Kenngrößen mit der höchsten Korrelation zur ERP (siehe Abbildung 4.3). Im Gegensatz zu den meisten anderen Kenngrößen, wie bspw. der Kenngröße $\Delta FD_{F,arith-arith}$, welche die höchste Korrelation mit der ERP aufweist, beschreiben FD_{max} und $FD_{F,arith}$ nicht nur eine Eigenschaft der Flussdichteverteilung, sondern sie können darüber hinaus konkreten Orten innerhalb der Struktur zugeordnet werden – zum einem dem Ort, an dem die maximale Flussdichte auftritt, und zum anderem dem Ort, an dem die anregende Kraft angreift. Um mit Hilfe der STI-basierten Kenngrößen Modifikationen auf einer Struktur zu platzieren, ist eine solche Beziehung zwischen Ort und Kenngröße notwendig. Die Werte beider Kenngrößen sind bei Modellen mit höherer ERP ebenfalls höher als bei Modellen mit niedriger ERP. Aus diesem Grund sollte es ein Ziel sein, mittels Modifikationen die Werte beider Kenngrößen zu senken. Da beide Kenngrößen Orten auf der Struktur zugeordnet werden können, wäre die Platzierung von Modifikationen an eben diesen Orten ein erster Ansatz.

Forschungsarbeiten, die – mit dem Ziel einer Schallreduktion – auf Basis einer STI-Analyse Modifikationen platzieren, sind im Rahmen des Stands der Forschung in Abschnitt 1.2 beschrieben. Die

wichtigsten Erkenntnisse werden hier allerdings noch einmal kurz zusammengefasst. HERING zeigt an zwei unterschiedlichen Strukturen, einer Ölwanne [23, S. 92 ff.] und einem Gepäckraumboden [23, S. 102 ff.], dass sowohl eine Massen- als auch eine Steifigkeitserhöhung auf einem ausgeprägten Energiepfad das gesamte Energieniveau in den Strukturen in der entsprechenden Anregungsmode senkt und sich dadurch bedingt auch die Amplituden der Schwinggeschwindigkeiten senken, was mutmaßlich zu einer Reduktion der Schallabstrahlung führt. Das Energieniveau des STI-Verlaufs senkt sich in beiden Modellen aufgrund der Modifikation in der gesamten Struktur – sowohl vor als auch hinter der Modifikation. Die Modifikation wird jeweils auf einem ausgeprägten Energiepfad platziert, welcher u. a. dadurch gekennzeichnet ist, dass die Flussdichte dort im Vergleich zu den übrigen Strukturbereichen – abgesehen vom Ort der Kraftanregung, wo die Flussdichte auch höher sein kann – hoch ist. Diese Ergebnisse erlauben die Vermutung, dass Orte hoher Flussdichten ein gutes Kriterium für die Platzierung von Modifikationen ist, wenn das Ziel die Senkung des Energieniveaus und der Schwinggeschwindigkeiten und damit die Reduktion der Schallabstrahlung ist.

Innerhalb einer Struktur weist die STI allerdings nicht nur auf den maßgeblichen Energiepfaden eine hohe Flussdichte auf, sondern in den meisten Fällen auch am „Ursprung“ der Energiepfade – dem Anregungsort. Dieser wird in den Untersuchungen von HERING nicht durch Modifikationen verändert. Daher stellt sich die Frage, ob eine mögliche Modifikationsregel, die besagt, Strukturen an Orten hoher Flussdichten zu modifizieren, unterscheiden muss, ob diese Flussdichte am Ort der Kraftanregung oder weiter entfernt von ihr auftritt. Dem entgegen steht die allgemeine Regel zum lärmarmen Konstruieren, welche lautet, die Eingangsimpedanz zu erhöhen [1, S. 315], was in der Regel durch eine Erhöhung der Masse und/oder Steifigkeit direkt am Anregungsort erreicht wird [4, S. 244].

Die Zusammenfassung der obigen Ausführungen lassen darauf schließen, dass Modifikationen an Orten hoher Flussdichten – sowohl am Ort der Kraftanregung als auch weiter entfernt auf ausgeprägten Energiepfaden – die Schallabstrahlung senken. Darauf deuten sowohl die Zusammenhänge zwischen STI und ERP als auch die Literatur hin. Aus diesem Grund wird die allgemeine Hypothese

„Massen- und/oder Steifigkeitserhöhungen an den Orten mit den höchsten Flussdichten der STI senken die Schwinggeschwindigkeiten und damit die ERP.“

als STI-basierte Modifikationsregel definiert. Konkrete Angaben wie Höhe der Zusatzmasse und/oder -steifigkeit oder die Größe einer solchen Modifikation sind nicht Teil der Hypothese, sondern werden im Rahmen der Hypothesenuntersuchung in Abschnitt 4.2.2 entsprechend festgesetzt oder variiert.

An dieser Stelle sei das Ergebnis der Hypothesenuntersuchung vorweggenommen, obwohl dies in der wissenschaftlichen Praxis unüblich ist. Die Untersuchungen werden zeigen, dass die Hypothese, so wie sie gestellt wurde, verworfen werden muss, da sie nicht für alle untersuchten Anregungsmoden gültig ist. Beim Plattenmodell können zwar für alle untersuchten Anregungsmoden ERP-Reduktionen erzielt werden, beim komplexeren Modell des Gepäckraumbodens ist dies aber nicht der Fall. Die Durchführung der Untersuchungen sowie die Ergebnisse werden im Rahmen dieser Arbeit dennoch präsentiert, da der methodische Ansatz dieses Ergebnis nicht erwarten lässt und diese Arbeit dazu beitragen soll, dass dieses Wissen nicht verloren geht, sondern in zukünftige Ansätze zum akustischen Strukturdesign anhand der STI einfließen kann.

4.2.2 Aufbau der modifizierten Modelle

Die Untersuchungen werden an den beiden Basismodellen Platte und Gepäckraumboden (siehe Abschnitt 3.2.1) durchgeführt. Alle Untersuchungen erfolgen jeweils für die ersten 25 Anregungsmoden (siehe Abschnitt 3.1). Für jede Anregungsmode werden anhand der Flussdichtewerte der einzelnen Elemente zunächst diejenigen Elemente identifiziert, auf denen anschließend die Modifikation in Form einer Skin (siehe Abschnitt 3.2.2) modelliert wird. Dabei werden die Elemente mit den höchsten Flussdichtewerten selektiert. Da sich die STI-Vektorfelder und damit die Flussdichteverteilungen für alle Anregungsmoden unterscheiden, wird somit für jede Anregungsmode ein eigenes Modell erstellt. Die entsprechende Anregungsmode, deren Flussdichtewerte als Basis für die Modifikationsform und -position dienen, wird daher im Folgenden „Auslegungsmode“ genannt. Die Anzahl und Auswahl der Elemente für die Modifikation werden für das Plattenmodell anhand von zwei unterschiedlichen Selektionsvarianten bestimmt. Im ersten Fall wird die räumliche Ausdehnung der Modifikation direkt festgelegt, indem sie bezogen auf die Gesamtfläche A_{ges} der Struktur prozentual vorgegeben wird. Dabei werden alle Elemente gemäß ihrer Flussdichte absteigend sortiert, und es werden von oben startend so viele Elemente selektiert, bis sie in Summe der prozentualen Flächenvorgabe entsprechen. Im zweiten Fall wird ein Grenzwert für die Flussdichte vorgegeben, der prozentual auf die maximale Flussdichte bezogen ist. Bei der zweiten Variante ergibt sich die räumliche Ausdehnung der Modifikation demnach aus der Anzahl der Elemente, welche eine Flussdichte besitzen, die größer oder gleich dem vorgegebenen Grenzwert ($X\%$ der maximalen Flussdichte ($\max(\text{FD})$)) ist. Für das Modell des Gepäckraumbodens werden Modifikationen anhand der Selektionsvariante 1 aufgebaut und vorgestellt. In Abbildung 4.11 sind am Beispiel der Platte für die beiden Auslegungsmoden 8 und 9 die resultierenden Modifikationsflächen für beide Selektionsvarianten gezeigt. Die prozentuale Flächenvorgabe für Variante 1 sowie der Flussdichtegrenzwert für Variante 2 betragen im Beispiel 10 % bzw. 20 %.

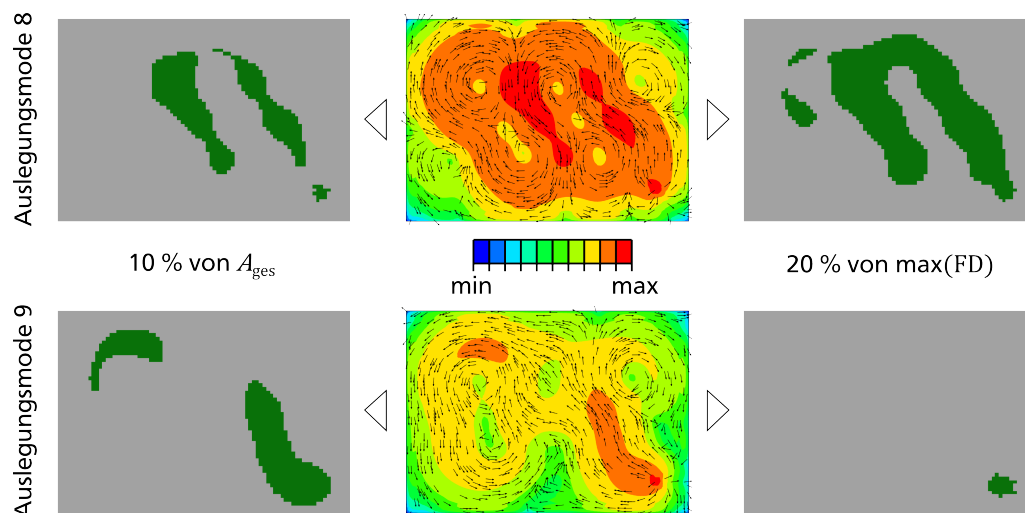


Abbildung 4.11: Beispiel für die STI-basierte Selektion der Orte (FE-Elemente) für eine Modifikation anhand zweier verschiedener Selektionsvarianten; links: prozentuale Begrenzung der Fläche, rechts: prozentuale Begrenzung der Flussdichte

Am Beispiel der ausgewählten Auslegungsmoden wird die unterschiedliche Auswirkung der zweiten Selektionsvariante auf die resultierende Modifikationsfläche gut sichtbar: Während die Modifikationsfläche bei Auslegungsmodus 8 größer ist als die entsprechende Fläche anhand Variante 1, ist sie bei

Auslegungsmode 9 verhältnismäßig klein. Dies liegt daran, dass in Anregungsmoden 9 die Flussdichte ausgehend vom Anregungsort stark abfällt, während in Anregungsmoden 8 in größeren Bereichen der Struktur – bezogen auf das Maximum – hohe Flussdichten vorliegen (größere Strukturbereiche sind rot eingefärbt).

In beiden Selektionsvarianten werden für alle Auslegungsmoden die Grenzwerte für die Elementauswahl variiert. Dadurch werden für jede Auslegungsmode jeweils mehrere Modelle mit verschiedenen großen Modifikationen aufgebaut. Die Modelle der Variante 1 werden im Folgenden Modelle $FD_{A,X\%,n}$ und die der Variante 2 Modelle $FD_{\max,X\%,n}$ genannt, wobei X der Platzhalter für den Grenzwert darstellt und n die Auslegungsmode bezeichnet. Die untersuchten Grenzwerte können Tabelle 4.2 entnommen werden.

Tabelle 4.2: Grenzwerte für die Elementauswahl beider Selektionsvarianten

Selektionsvariante	Bezugsgröße	Grenzwerte in %	Modellname
Variante 1	A_{ges}	0,1; 2; 5; 10; 20	$FD_{A,X\%,n}$
Variante 2	$\max(\text{FD})$	5; 10; 20; 40; 60	$FD_{\max,X\%,n}$

Wie anhand der Beispiele in Abbildung 4.11 gezeigt wird, unterscheiden sich bei Selektionsvariante 2 die Modifikationsgrößen bei konstantem Grenzwert für die einzelnen Auslegungsmoden. Bei Selektionsvariante 1 bleiben die Modifikationsgrößen dagegen konstant, allerdings kann die Vorgabe einer prozentualen Fläche aufgrund der diskreten Elementgrößen nicht exakt getroffen werden. Die resultierende Fläche der Modifikation wird je nach Grenzwert meist leicht unter oder über der vorgegebenen Fläche liegen. Die Anzahl der Elemente wird immer so gewählt, dass die Differenz der Modifikationsfläche zur Vorgabe minimal ist. Die durchschnittlich resultierenden Modifikationsgrößen für die einzelnen Grenzwerte sind in Tabelle 4.3 für die Platte für beide Selektionsvarianten und in Tabelle 4.4 für den Gepäckraumboden für die Selektionsvariante 1 zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Modifikationsgrößen für die verschiedenen Grenzwerte beider Selektionsvarianten für die Platte

Sel.-var.	Grenzwert in %	Modifikationsfläche in m^2	Sel.-var.	Grenzwert in %	Modifikationsfläche in m^2	
					A_{\min}	A_{\max}
1	0,1	0,0005	2	5	0,0001	0,0031
1	2,0	0,0108	2	10	0,0001	0,0074
1	5,0	0,0270	2	20	0,0002	0,0170
1	10,0	0,0539	2	40	0,0004	0,0606
1	20,0	0,1079	2	60	0,0005	0,2061

Da bei der Platte alle Elemente gleich groß sind, sind auch die resultierenden Modifikationsflächen bei der Selektionsvariante 1 für alle Auslegungsmoden bei konstantem Grenzwert identisch. Beim Gepäckraumboden unterscheiden sich die Elementgrößen und damit die resultierenden Flächen für die einzelnen Auslegungsmoden. Die in Tabelle 4.4 angegebenen Modifikationsflächen entsprechen daher den gemittelten Modifikationsflächen aller Auslegungsmoden bei dem jeweiligen Grenzwert. Die Modifikationsgrößen für die Plattenmodelle bei Selektionsvariante 2 variieren zwischen den Auslegungsmoden sehr stark. Tatsächlich weisen je nach Grenzwert nur bis zu 7 der 25 Auslegungsmoden (die Auslegungsmoden 12–14 und 22–25) eine Elementanzahl auf, die deutlich größer als die

Tabelle 4.4: Modifikationsgrößen für die verschiedenen Grenzwerte der Selektionsvariante 1 für den Gepäckraumboden

Sel.-var.	Grenzwert in %	Modifikationsfläche in m ²
1	0,1	≈ 0,0022
1	2,0	≈ 0,0437
1	5,0	≈ 0,1093
1	10,0	≈ 0,2185
1	20,0	≈ 0,4370

angegebene minimale Elementanzahl ist. Die resultierenden Modifikationen der verschiedenen Auslegungsmoden unterscheiden sich demnach für die meisten Grenzwerte nicht.

Neben der Größe und der Form der Modifikationen können über die beiden Materialparameter Dichte und Elastizitätsmodul sowie über die Skindicke auch die Massen- und die Steifigkeitsänderung beeinflusst werden. Auch hierbei werden unterschiedliche Einstellungen mit verschiedenen Werten untersucht. Die Modifikationseinstellungen unterscheiden sich in zwei Punkten. Der erste Punkt betrifft die Festlegung, ob bei variierendem Grenzwert und damit variierender Modifikationsgröße die Masse oder die Materialparameter konstant gehalten werden. Beides gleichzeitig ist nicht möglich, da Masse und Dichte bei vorgegebener Fläche und Skindicke rechnerisch aus der jeweils anderen Größe resultieren. Eine in Abhängigkeit von der Fläche variable Skindicke wäre eine Möglichkeit, Masse und Dichte gleichzeitig konstant zu halten, allerdings würden dadurch Skindicken entstehen, für welche die Schalentheorie der verwendeten FE-Elemente nicht mehr gültig wäre. Daher wird die Skindicke konstant gehalten. Der zweite Punkt, in dem sich die Modifikationseinstellungen unterscheiden, betrifft die Werte für die vorgegebene Masse bei variierenden Materialparametern sowie die Werte für die vorgegebene Dicke bei konstant gehaltenen Materialparametern. Die Steifigkeit der Modifikationen wird nicht konkret vorgeben, da sie auch von der Geometrieform abhängig ist – der genaue Zusammenhang aber unbekannt ist. Insgesamt werden fünf unterschiedliche Modifikationseinstellungen (siehe Tabelle 4.5) sowohl bei der Platte als auch beim Gepäckraumboden für jeweils beide Selektionsvarianten bzw. nur für die Selektionsvariante 1 untersucht.

Tabelle 4.5: Angabe der konstant gehaltenen Größen und ihre Werte in den Modifikationseinstellungen für Platte und Gepäckraumboden (GB); (frei gelassene Einträge sind in den Tabellen A.5–A.7 im Anhang gegeben)

Nr.	Dicke in mm (Platte / GB)	Masse in kg	Dichte in kg/m ³	Elastizitätsmodul in N/m ² (Platte / GB)
1	5 / 0,705	1		
2	5 / 0,705	0,5		
3	5 / 0,705	0,1		
4	5 / 0,705		7850	$2,04 \cdot 10^{11} / 2,1 \cdot 10^{11}$
5	2,55 / 0,3525		7850	$2,04 \cdot 10^{11} / 2,1 \cdot 10^{11}$

Die resultierenden Werte für die Masse oder die beiden Materialparameter Dichte und Elastizitätsmodul der fünf untersuchten Modifikationseinstellungen unterscheiden sich je nach Selektionsvariante

und Basismodell und sind in Tabelle 4.5 daher nicht angegeben. Eine Übersicht dieser Werte ist in den Tabellen A.5–A.7 im Anhang gegeben. Die Massen von 1 kg, 0,5 kg und 0,1 kg entsprechen ungefähr 4,7 %, 2,5 % bzw. 0,5 % der Plattenmasse.

4.2.3 Untersuchung der aufgestellten Hypothese

Eine Gegenüberstellung der ERP der modifizierten Plattenmodelle $FD_{A,X\%,n}$ in ihren Auslegungsmo- den mit den ERP des Basismodells ist für die Modifikationseinstellung Nr. 1 (Masse konstant bei 1 kg) in Abbildung 4.12 für alle Grenzwerte X zu sehen. Links sind die ERP-Pegel und rechts die Pegeldif- ferenzen zum Basismodell dargestellt. Die Differenzen der ERP-Pegel des Basismodells mit sich selbst sind in schwarz als visuelle Referenz aufgetragen. Positive Differenzen bedeuten, dass das modifi- zierte Modell in seiner Auslegungsmode einen höheren ERP-Pegel als das Basismodell aufweist, und negative Differenzen, dass der ERP-Pegel im Vergleich zum Basismodell gesenkt wird.

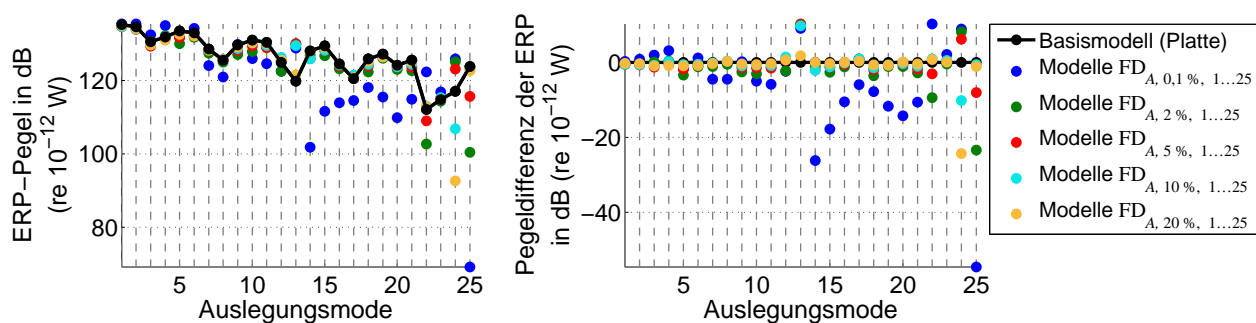


Abbildung 4.12: ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{A,X\%,1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1

Die Punkte der einzelnen Modelle $FD_{A,X\%,n}$ bei gleichem Grenzwert X sind nicht durch eine Linie mit- einander verbunden, um zu verdeutlichen, dass es sich um verschiedene Modelle handelt – jeweils basierend auf der STI der entsprechenden Auslegungsmode. Dagegen sind die Punkte des Basismo- dells miteinander verbunden, da alle Werte zum gleichen Modell gehören. Wie auch in der Legende von Abbildung 4.12 wird im Folgenden das n im Modellnamen durch $1 \dots 25$ ersetzt, wenn die Ge- samtheit aller n Modelle gemeint ist. Die meisten Modelle erzielen in ihrer Auslegungsmode keine Reduktion der ERP-Pegel in einer nennenswerten Größenordnung. Um diesen Umstand zu verdeutli- chen, ist in Abbildung 4.13 ein vergrößerter Ausschnitt der Pegeldifferenzen der ERP zu sehen. Die rote Linie bei -3 dB markiert die Grenze, unterhalb welcher in dieser Arbeit von einer nennenswerten Reduktion der ERP-Pegel gesprochen wird. Eine Reduktion um 3 dB entspricht bei Leistungsgrößen wie der ERP einer Halbierung der Leistung ($10 \lg(2)$ dB \approx 3 dB).

Eine Ausnahme bilden die Modelle $FD_{A,0,1\%,1...25}$, welche in einigen Auslegungsmoden sogar zu Re- duktionen der ERP-Pegel um mehr als 10 dB führen. Aber auch bei diesem Grenzwert ist kein allge- mein gültiger Trend in den Pegeldifferenzen zu erkennen, d. h. die ERP-Pegel werden nicht in allen Auslegungsmoden reduziert, sondern in einigen sogar erhöht. Bei den resultierenden Modifikations- flächen der Modelle $FD_{A,0,1\%,1...25}$ handelt es sich in den meisten Auslegungsmoden ausschließlich um die Elemente direkt an der Kraftanregung, da dort die Flussdichte meist am höchsten ist. Damit kön- nen diese Reduktionen der ERP-Pegel nicht unbedingt als Erfolg der aufgestellten STI-basierten Mo- difikationsregel gewertet werden, sondern resultieren aus der Erhöhung der Eingangsimpedanz. Die

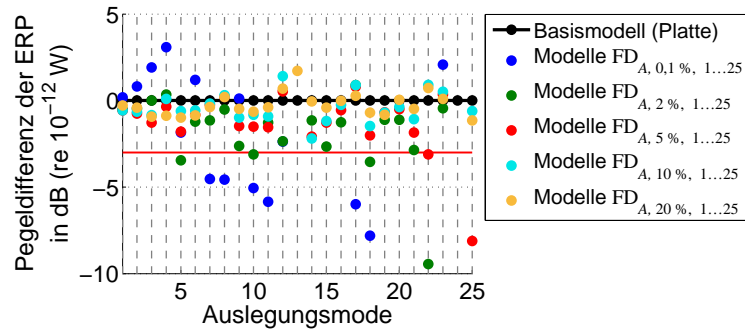


Abbildung 4.13: vergrößerter Ausschnitt der Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{A,X} \%, 1...25$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1

STI-basierte Modifikationsregel zeigt für diesen Fall somit keinen Mehrwert gegenüber der bekannten Konstruktionsregel einer Eingangsimpedanzerhöhung. Das Gegenteil ist sogar der Fall: In vier der fünf Auslegungsmoden 12, 13, 22, 23 und 24, in denen die Modifikation der Modelle $FD_{A,0,1 \%, 1...25}$ nicht ausschließlich die Elemente um die Kraftanregung enthält, wird keine Reduktion der ERP-Pegel erzielt. Nichtsdestotrotz führt die Mehrheit der Modelle $FD_{A,X \%, 1...25}$ über alle Grenzwerte gesehen zwar nicht zu einer nennenswerten Reduktion der ERP-Pegel (≥ 3 dB), aber doch wenigstens zu einer gewissen Reduktion, was im Ausschnitt in Abbildung 4.13 gut zu erkennen ist, da die große Mehrheit der Punkte unterhalb der schwarzen Referenzkurve liegt. Eine gemeinsame Betrachtung der Abbildungen 4.12 und 4.13 zeigt auch, dass die ERP-Pegel mit Ausnahme der Auslegungsmodus 13 für alle Auslegungsmoden für mindestens einen Grenzwert X gesenkt werden können. In vielen Auslegungsmoden sinkt die erzielbare Reduktion der ERP-Pegel mit steigender Modifikationsgröße.

Für die Modifikationseinstellungen Nr. 2 und Nr. 3, bei denen die Gesamtmasse der Modifikationen ebenfalls konstant, aber auf einem kleineren Wert gehalten wird, fallen die erzielten Reduktionen der ERP-Pegel in den meisten Auslegungsmoden geringer aus als für die Modifikationseinstellung Nr. 1. Eine Ausnahme stellen dagegen diejenigen Auslegungsmoden dar, in denen die Modifikationsmasse von 1 kg (Modifikationseinstellung Nr. 1) zu keiner Reduktion ERP-Pegel führen konnte. In diesen Auslegungsmoden führt die deutlich kleinere Masse von 0,1 kg (Modifikationseinstellung Nr. 3) zu einer Reduktion der ERP-Pegel, siehe Abbildung 4.14.

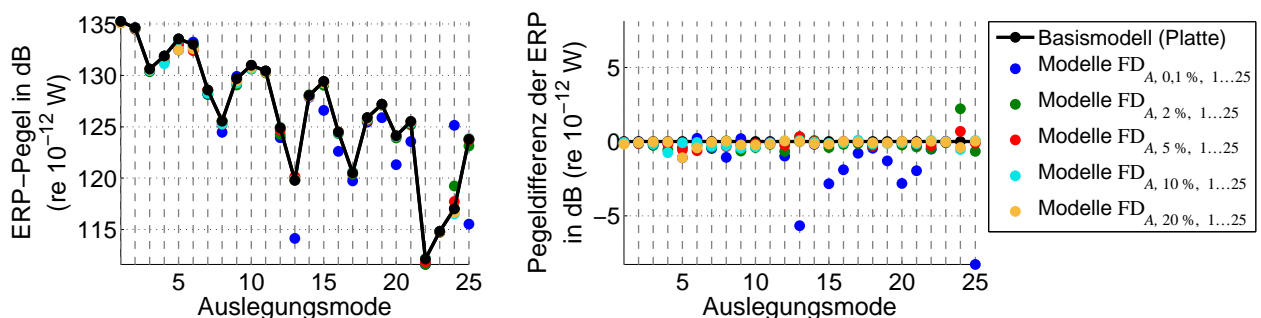


Abbildung 4.14: ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{A,X} \%, 1...25$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 3

Im Fall der Auslegungsmodus 13 kommt es für das Modell $FD_{A,0,1 \%, 13}$ sogar zu einer nennenswerten Pegeländerung von $-5,7$ dB. Nicht in allen Auslegungsmoden gilt somit, dass eine höhere Masse im Sinne einer ERP-Reduktion besser ist.

Die Ergebnisse der Plattenmodelle $FD_{A,X\%,1...25}$ für die Modifikationseinstellung Nr. 4 (Materialparameter von Stahl) sind – analog zu den Abbildungen 4.12 und 4.14 – in Abbildung 4.15 zu sehen.

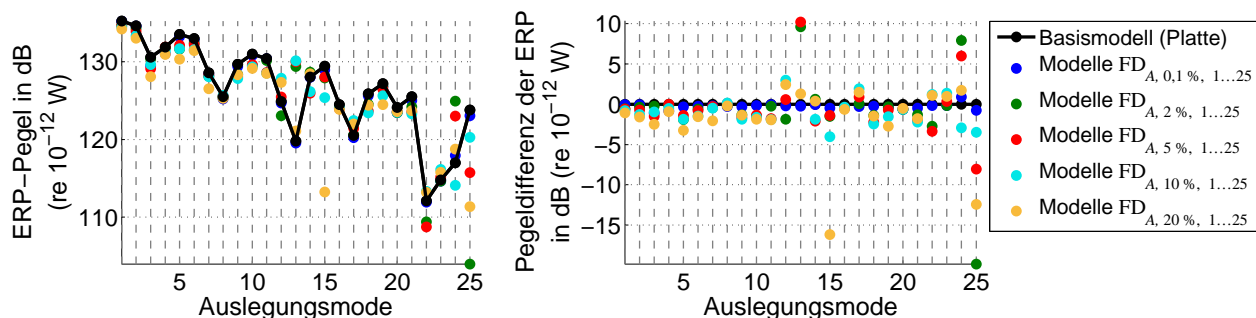


Abbildung 4.15: ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{A,X\%,1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4

Die maximal erzielten Reduktionen der ERP-Pegel sind deutlich geringer als in Abbildung 4.12. In dieser Analyse bewirken die Modelle $FD_{A,20\%,1...25}$ mit der größten Modifikationsfläche höhere Pegeldifferenzen der ERP als die Modelle $FD_{A,0,1\%,1...25}$ mit der kleinsten Modifikationsfläche, was im vergrößerten Ausschnitt in Abbildung 4.16 deutlicher zu erkennen ist.

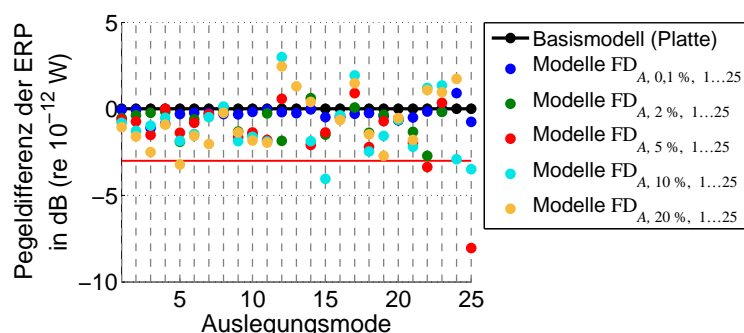


Abbildung 4.16: vergrößerter Ausschnitt der Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{A,X\%,1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4

Die Masse der Modifikation steigt allerdings mit zunehmendem Grenzwert an und erreicht bis zum Grenzwert von 20 % einen Wert von 4,23 kg (20 % der Plattenmasse), was zu deutlichen Verschiebungen der Eigenfrequenzen – mehr als 10 % Änderung – zu niedrigeren Frequenzen führt. Bei den Modellen $FD_{A,20\%,1...25}$ kann daher nicht mehr von „leicht modifizierten Modellen“ gesprochen werden, was als Randbedingung der Untersuchungen definiert ist. Die Ergebnisse der Modifikationseinstellung Nr. 5 gleichen denen der Modifikationseinstellung Nr. 4 sehr stark, weswegen sie hier nicht weiter beschrieben werden.

Die Ergebnisse der Plattenmodelle $FD_{\max,X\%,1...25}$ (Selektionsvariante 2) sind exemplarisch für die Modifikationseinstellung Nr. 1 (Masse konstant bei 1 kg) in Abbildung 4.17 zu sehen, da für diesen Fall in den meisten Auslegungsmoden höhere Reduktionen der ERP-Pegel als für die Modifikationseinstellungen Nr. 2–4 erzielt werden können.

Die Unterschiede in den Pegeldifferenzen der ERP zwischen einzelnen Grenzwerte X sind für die meisten Auslegungsmoden sehr gering. Dies war aufgrund der nahezu gleichen Modifikationsgrößen in diesen Auslegungsmoden auch zu erwarten. Für die meisten Auslegungsmoden kann eine deutliche

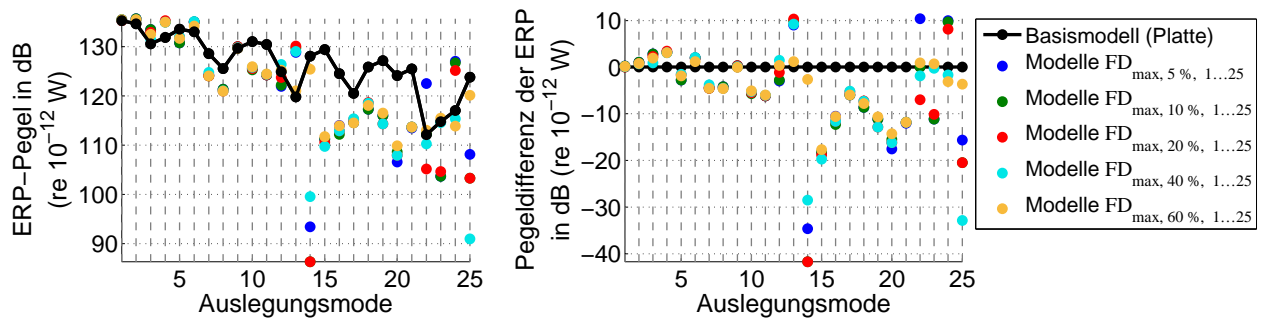


Abbildung 4.17: ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{\max, X \%}$, 1...25 bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1

Reduktion der ERP-Pegel erzielt werden. Allerdings lässt sich kein Grenzwert identifizieren, der in allen Auslegungsmoden eine gültige Vorgabe für die Modifikationsgröße macht, um die ERP zu senken.

Für den Gepäckraumboden sind exemplarisch die Ergebnisse der Modifikationseinstellungen Nr. 1 für alle Grenzwerte in Abbildung 4.18 zu sehen.

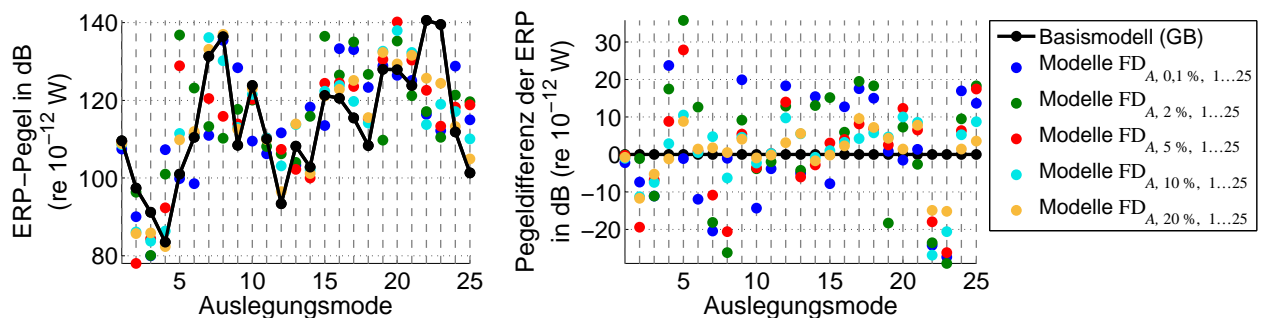


Abbildung 4.18: ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $FD_{A, X \%}$, 1...25 bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1

Die Mehrheit der Punkte liegt oberhalb der schwarzen Referenzkurven, was bedeutet, dass die meisten Modelle zu einer Erhöhung der ERP-Pegel im Vergleich zum Basismodell führen. Auch für die Modifikationseinstellungen 2–5 ist dies der Fall, weswegen sie hier nicht genauer beschrieben werden. Damit fällt das Ergebnis für den Gepäckraumboden deutlich schlechter aus als für die Platte. Die Hypothesenuntersuchung am Gepäckraumboden führt zur Feststellung, dass die Hypothese (leider) verworfen werden muss: Massen- und/oder Steifigkeitserhöhungen an den Orten mit den höchsten Flussdichten der STI führen nicht pauschal zu einer Reduktion der ERP-Pegel.

Ergebnisse ähnlicher Untersuchungen, bei denen die Umsetzung der Modifikation über Punktmassen und diskrete Federn erfolgt, sind in [71, 72] publiziert. Diese Untersuchungen haben grundsätzlich zu den gleichen Aussagen geführt.

4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die aufgestellte Hypothese einer STI-basierten Modifikationsregel muss aufgrund der Ergebnisse verworfen werden. Die Flussdichte alleine kann nicht als Kriterium verwendet werden, um Positionen auf einer Struktur zu lokalisieren, an denen Modifikationen zu einer Reduktion der Schallabstrahlung führen. Weder kleine noch große Modifikationsmassen und weder kleine noch große Modifikationsflächen führen in allen untersuchten Auslegungsmoden zu nennenswerten Reduktionen der ERP. Die

meisten modifizierten Modelle weisen sogar bei einer Modifikationsmasse von 1 kg, was einer Massenerhöhung um 4,7 % entspricht, in ihrer Auslegungsmode nur Reduktionen der ERP-Pegel kleiner 3 dB auf. Obwohl die Aussichten der untersuchten Modifikationsregel sehr vielversprechend waren, haben die Untersuchungen nicht zum erwarteten und gewünschten Ergebnis geführt.

Wie in Abschnitt 1.3 der Einleitung beschrieben, wird parallel zu den hier vorgestellten Untersuchungen, eine Modifikationsregel basierend auf der STI zu finden, ein weiterer Ansatz untersucht. Dieser Ansatz führt – so viel sei vorweggenommen – zu besseren Ergebnissen, weswegen an dieser Stelle keine weiteren Variationen untersucht werden und auch keine weiteren Modifikationsregeln auf Basis der STI aufgestellt und überprüft werden.

5 Entwicklung von Modifikationsregeln anhand einer systematischen Strukturanalyse

Eine alternative Methode zur Identifikation von Modifikationsregeln basierend auf der STI-Analyse ist die systematische Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Modifikationsorten auf einer Struktur und der jeweils resultierenden ERP. Die Vorgehensweise der systematischen Strukturanalyse zur Entwicklung von Modifikationsregeln erfolgt in fünf Schritten und ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Jeder dieser fünf Schritte wird im Folgenden in einem eigenen Abschnitt beschrieben.

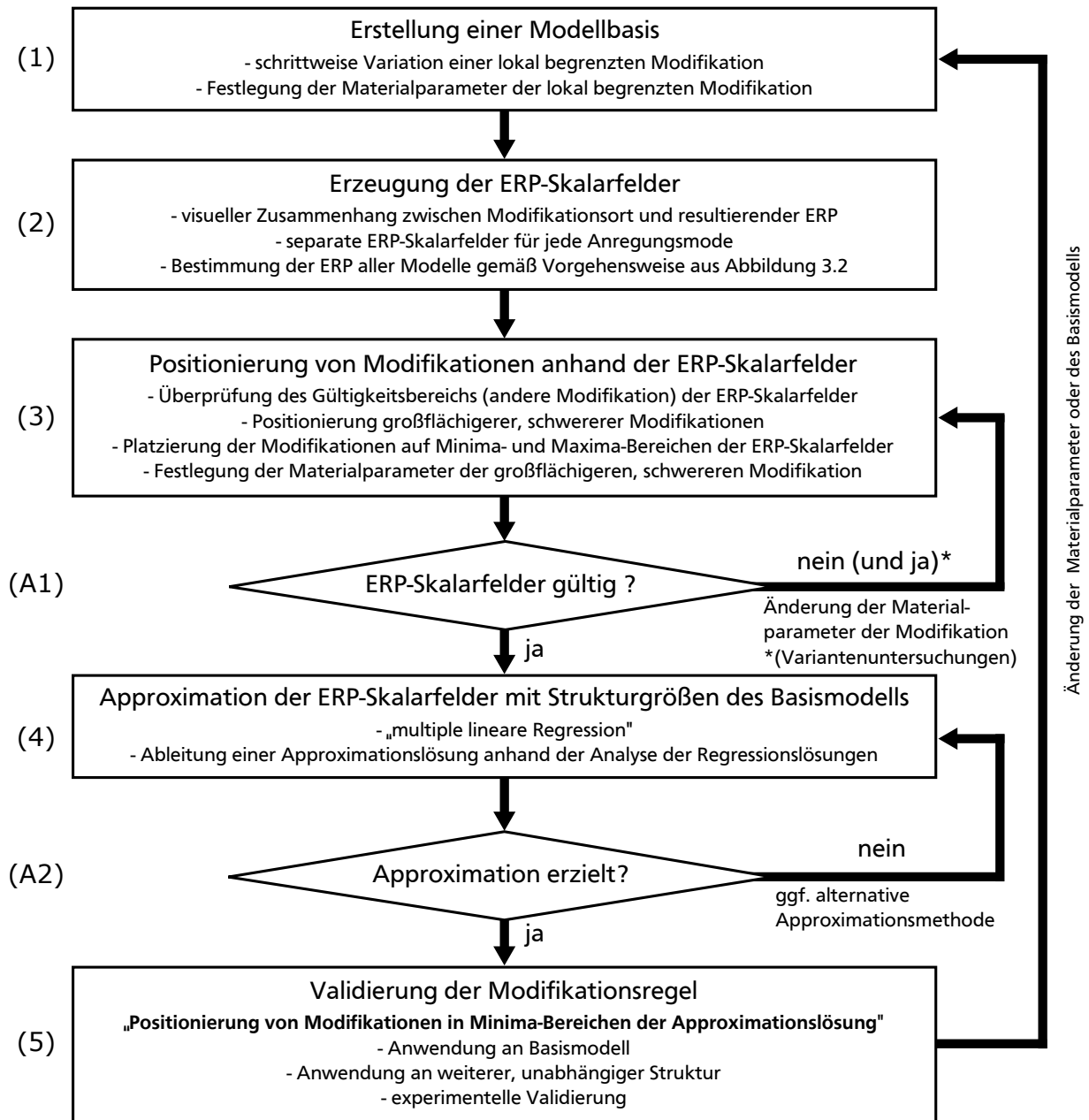


Abbildung 5.1: Vorgehen zur Entwicklung von Modifikationsregeln anhand einer systematischen Strukturanalyse; Durchlauf der Methode für beide Basismodelle

Der Strukturanalyse liegt die Erstellung einer Modellbasis (1) zugrunde, für welche schrittweise eine lokal begrenzte Modifikation auf dem Basismodell variiert wird. Anschließend werden die ERP-Skalarfelder erzeugt (2), welche den Zusammenhang zwischen den Modifikationsorten und den resultierenden ERP-Werten der jeweiligen Modelle visualisieren. Für jede Anregungsmod entstehen

separate ERP-Skalarfelder, für die die ERP-Werte aller Modelle der Modelldatenbasis gemäß der Vorgehensweise in Abbildung 3.2 bestimmt werden. Anhand dieser ERP-Skalarfelder kann beispielsweise für jede Anregungsmode abgelesen werden, an welcher Strukturstelle eine Modifikation zur geringsten oder auch zur höchsten ERP geführt hat. Anschließend kann genauer analysiert werden, welche Eigenschaften diese Orte besitzen. Es kann weiterhin untersucht werden, ob es Zusammenhänge zwischen den ERP-Skalarfeldern und Strukturgrößen wie den Schwinggeschwindigkeiten oder den Schnittgrößen gibt.

Die Modifikationen, die zur Erstellung der Modellbasis und damit zur Erstellung der ERP-Skalarfelder genutzt werden, führen allerdings aufgrund ihrer Größe und ihrer Materialparameter nur zu geringen Änderungen in der ERP. Daher gilt es zunächst zu untersuchen, ob die ERP-Skalarfelder nur für die lokal begrenzten Modifikationen der untersuchten Modellbasis einen gültigen Zusammenhang zwischen Modifikationsort und ERP wiedergeben oder ob dieser Zusammenhang auch auf großflächigere, schwerere und damit praxisnähere Modifikationen erweitert werden kann, welche eher zu wahrnehmbaren Änderungen in der ERP führen werden. Daher ist der nächste, zur Entwicklung von Modifikationsregeln relevante Schritt die Überprüfung, ob die ERP-Skalarfelder als „Landkarten“ genutzt werden können, um auch großflächigere Strukturmodifikationen so zu positionieren, dass sie zu einer gezielten Änderung der Schallabstrahlung führen. Dafür werden verschiedene Modifikationen anhand der ERP-Skalarfelder positioniert und es wird ihr Einfluss auf die ERP untersucht. Da die ERP-Skalarfelder sowohl Minima als auch Maxima aufweisen, wird die Möglichkeit genutzt, eine gezielte Beeinflussung der ERP in beide Richtungen – Reduzierung oder Erhöhung – zu überprüfen. Unabhängig davon, ob direkt eine gezielte ERP-Änderung erreicht wird oder nicht und die ERP-Skalarfelder damit als gültige „Landkarten“ angesehen werden können (A1), werden unterschiedliche Varianten von Modifikationen untersucht.

Stellt sich bei den Untersuchungen heraus, dass die ERP-Skalarfelder auch für großflächigere, schwerere Strukturmodifikationen gelten, wird anschließend der Zusammenhang zwischen den Strukturgrößen und den ERP-Skalarfeldern untersucht (4). Es wird angenommen, dass die Strukturgrößen des Basismodells bereits Auskunft darüber geben, wo Strukturänderungen sinnvollerweise zu positionieren sind, um die Schallabstrahlung zu reduzieren. Deshalb wird untersucht, ob und wie sich die ERP-Skalarfelder anhand der Strukturgrößen approximieren lassen. Dabei wird eine Approximation basierend auf einer multiplen linearen Regression verwendet. Eine detaillierte Beschreibung zur Vorgehensweise bei der Approximation erfolgt im entsprechenden Abschnitt. Ist eine Approximationslösung gefunden (A2), so entspricht die Positionierung von Modifikationen in den Minimabereichen dieser Approximationslösung einer Modifikationsregel. Diese Modifikationsregel wird anschließend validiert (5). Die Validierung erfolgt in drei Schritten. Zuerst wird die Modifikationsregel an dem Modell angewendet, für das sie entwickelt wurde. Danach wird eine weitere, unabhängige Struktur entsprechend der Modifikationsregel verändert und die ERP-Werte werden mit denen der unmodifizierten Struktur verglichen. Abschließend erfolgt – für eine Modifikationsregel – noch eine experimentelle Validierung.

Nacheinander werden drei verschiedene Modifikationsarten separat analysiert, was durch die äußere Schleife von Schritt (5) zu Schritt (1) dargestellt wird. Dabei werden jeweils alle fünf Schritte durchlaufen, sodass auch mehrere Modifikationsregeln entstehen. Die Modifikationsarten unterscheiden

sich in den Einstellungen der Materialparameter. Ziel ist es, den Massen- und Steifigkeitseinfluss auf die ERP sowohl separat als auch gemeinsam zu analysieren. Ebenso werden alle Schritte für beide Basismodelle – Platte und Gepäckraumboden, siehe Abschnitt 3.2.1 – durchgeführt. Im Rahmen der Approximation (4) ist es daher wichtig, die Ergebnisse beider Basismodelle miteinander abzugleichen, da eine Modifikationsregel nur allgemeingültig ist, wenn sie für beide Modelle identisch ist.

5.1 Erstellung der Modellbasen

Der Zusammenhang zwischen den Modifikationsorten und den resultierenden ERP-Werten soll systematisch untersucht werden. Systematisch bezieht sich in diesem Fall darauf, dass nacheinander, so gut wie möglich, jede Stelle beider Basismodelle, Platte und Gepäckraumboden, verändert werden soll, um die jeweils resultierende ERP in den verschiedenen Anregungsmoden aufgrund dieser Modifikation zu bestimmen. Dafür bietet sich eine elementweise Modifikation der Basismodelle an. Für beide Basismodelle wird daher eine Modellbasis aufgebaut, indem, wie in Abbildung 5.2 zu sehen ist, nacheinander auf Element für Element des FE-Netzes eine Skin (siehe Abschnitt 3.2.2) aufgebracht wird. Aufgrund der Anzahl an Elementen beider Modelle enthalten die resultierenden Modellbasen von Platte und Gepäckraumboden 5394 bzw. 15288 Modelle.

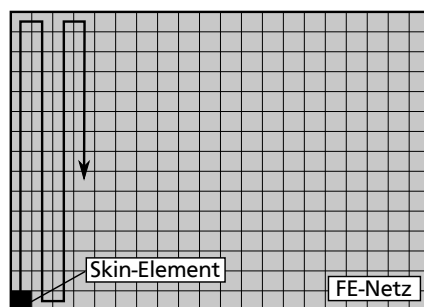


Abbildung 5.2: Vorgehen der systematischen Strukturmodifikation durch ein Skin-Element zur Erstellung der ERP-Skalarfelder am Beispiel der Platte

Die Dicke des Skin-Elements wird jeweils entsprechend der Dicke der Basismodelle gewählt. Auch die Materialparameter werden in Anlehnung an die Materialparameter der Basismodelle eingestellt, wobei die Strukturdämpfung η in jedem Fall zu Null gesetzt wird, um nur den Massen- und Steifigkeitseinfluss zu untersuchen. Der Einfluss einer zusätzlichen Masse und Steifigkeit soll dabei sowohl gemeinsam als auch einzeln analysiert werden. Aus diesem Grund werden für jedes Basismodell drei verschiedene Modellbasen mit unterschiedlichen Materialparametern des Skin-Elementes erstellt. Um den reinen Masseneinfluss zu untersuchen, erhält das Skin-Element die Dichte der Basismodelle und einen Wert nahe Null für den Elastizitätsmodul. Ein Wert von exakt Null lässt sich FE-bedingt für den Elastizitätsmodul nicht einstellen. Im zweiten Fall, zur Ermittlung des Steifigkeitseinflusses, wird die Dichte des Skin-Elements zu Null gesetzt und der Elastizitätsmodul auf den Wert des Elastizitätsmoduls der Basismodelle gesetzt. Im dritten Fall werden sowohl für die Dichte als auch für den Elastizitätsmodul die Werte der Basismodelle verwendet. Die Materialparameter aller drei Modifikationsfälle zur Erstellung der unterschiedlichen ERP-Skalarfelder sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Da bei der Platte alle Elemente gleich groß sind, führt das Skin-Element in den Fällen 1 und 3 auch in allen Modellen der Modellbasis zur gleichen Massenerhöhung von 0,003925 kg ($1/5394 \cdot 100\% = 0,0185\%$ der Gesamtmasse). Beim Gepäckraumboden variiert die Massenerhöhung der einzelnen

Tabelle 5.1: Einstellungen der Materialparameter der drei Modifikationsfälle für die Erstellung der ERP-Skalarfelder

Fall-Nr.	untersuchter Einfluss	Dichte in kg/m ³	Elastizitätsmodul in N/m ² (Platte / Gepäckraumboden)
Fall 1	Masse	7850	0,0001
Fall 2	Steifigkeit	0	$2,04 \cdot 10^{11}$ / $2,1 \cdot 10^{11}$
Fall 3	Masse und Steifigkeit	7850	$2,04 \cdot 10^{11}$ / $2,1 \cdot 10^{11}$

Modelle mit der Elementgröße des Skin-Elements. Im Durchschnitt fügt das Skin-Element beim Gepäckraumboden in den Fällen 1 und 3 eine Masse von 0,00079 kg ($1/15288 \cdot 100\% = 0,0065\%$ der Gesamtmasse) hinzu. Die Unterschiede in den Massen der Skin-Elemente beider Basismodelle ergeben sich hauptsächlich durch die unterschiedlichen Dicken beider Basismodelle.

Nachdem für beide Basismodelle jeweils die drei Modellbasen der Modifikationsfälle Nr. 1–Nr. 3 aufgebaut sind, wird für jedes einzelne Modell die ERP in den jeweils ersten 25 Anregungsmoden des Modells gemäß dem Vorgehen in Abbildung 3.2 bestimmt.

5.2 Visualisierung des Zusammenhangs zwischen den Modifikationen und der resultierenden ERP durch die Erstellung von ERP-Skalarfeldern

Für jede Modellbasis wird pro Anregungsmodus ein ERP-Skalarfeld erstellt. Dafür werden von allen Modellen der Modellbasis die ERP-Pegel dieser Anregungsmodus zusammengeführt und in der Ergebnisdatei (.odb) des Basismodells in einen neu erzeugten „FieldOutput“ gespeichert. Ein „FieldOutput“ entspricht in ABAQUS/CAE einer Möglichkeit, Daten über der Geometrie darzustellen [62, Kap. 4.1]. Die Daten können dabei u. a. pro Element übergeben werden, was für die ERP-Skalarfelder getan wird. Das Vorgehen zur Erstellung der ERP-Skalarfelder ist anhand von drei Plattenmodellen in Abbildung 5.3 beispielhaft für die Anregungsmodus 7 dargestellt. Die drei Modelle sind dabei anhand der Position X, Y mit $X \in \{1, 2, \dots, 87\}$ und $Y \in \{1, 2, \dots, 62\}$ des Skin-Elements benannt, wobei sich die Position 1, 1 links unten auf der Platte befindet.

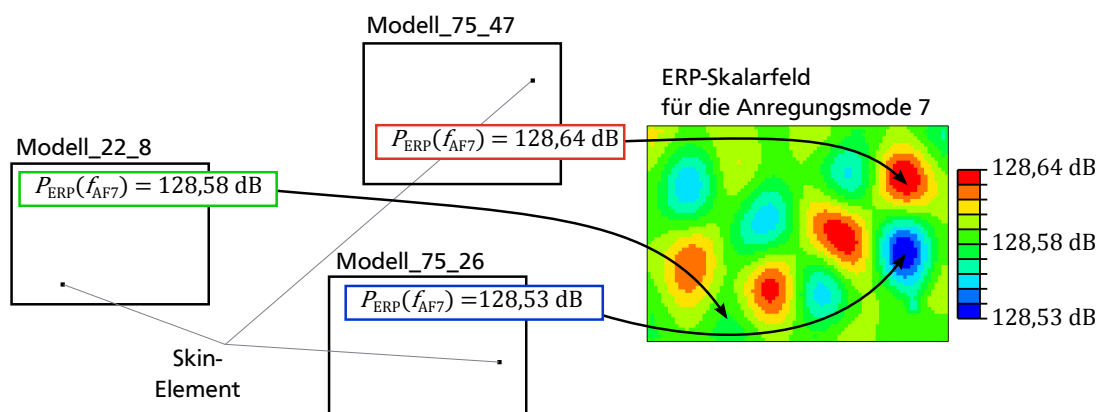


Abbildung 5.3: Vorgehen zur Erstellung der ERP-Skalarfelder am Beispiel der Anregungsmodus 7 für drei Plattenmodelle (das Skalarfeld enthält bereits die ERP-Pegel aller Modelle)

Für jedes ERP-Skalarfeld wird der ERP-Pegel jedes einzelnen Modells der Modellbasis immer demjenigen Element zugeordnet, auf dem die Modifikation aufgebracht ist. Zur Klarstellung sei hier noch einmal festgehalten, dass für jedes Modell pro Anregungsmodus ein Wert für den ERP-Pegel bestimmt

werden kann, der die äquivalent abgestrahlte Schallleistung des Modells in eben dieser Frequenz wiedergibt. Dementsprechend visualisieren die ERP-Skalarfelder den Zusammenhang zwischen den Modifikationspositionen und der resultierenden ERP der jeweiligen Modelle für eine Anregungsmoden. Bei einer Darstellung von Strukturgrößen über der Geometrie wie bspw. der Verschiebung gibt die Darstellung für jeden Strukturort an, wie hoch der auftretende Verschiebungswert an dieser Stelle ist. Hiervon grenzen sich die ERP-Skalarfelder klar ab: Die ERP-Skalarfelder geben nicht an, wo auf der Struktur ein bestimmter ERP-Pegel auftritt oder „wirkt“, sondern an welcher Stelle eine elementgroße Modifikation zu diesem ERP-Pegel des gesamten modifizierten Modells geführt hat.

Eine alternative Darstellung der ERP-Skalarfelder kann erstellt werden, indem nicht die ERP-Pegel aller Modelle zusammengeführt werden, sondern jeweils die Pegeldifferenzen zum ERP-Pegel des Basismodells in der jeweiligen Anregungsmoden. Die resultierenden ERP-Skalarfelder gleichen qualitativ denen der ERP-Pegel, weisen quantitativ aber einen Offset um den ERP-Pegel des Basismodells in der jeweiligen Anregungsmoden auf. Der Vorteil dieser Darstellungsform ist es, direkt ablesen zu können, an welchen Modifikationsorten es zu einer Absenkung oder zu einer Erhöhung der ERP kommt.

In den Abbildungen 5.4 und 5.6 sind die qualitativen ERP-Skalarfelder (identisch für Absolutwert- und Pegeldifferenzdarstellung) der Platte bzw. des Gepäckraumbodens exemplarisch für die Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 für alle drei Modifikationsfälle zu sehen. In den Abbildungen 5.5 bzw. 5.7 sind für die gleichen Anregungsmoden die ERP-Skalarfelder des Modifikationsfalls 3 mit den qualitativen ERP-Skalarfelder gegenübergestellt, die sich durch die Summation der ERP-Skalarfelder der beiden Modifikationsfälle 1 und 2 ergeben.

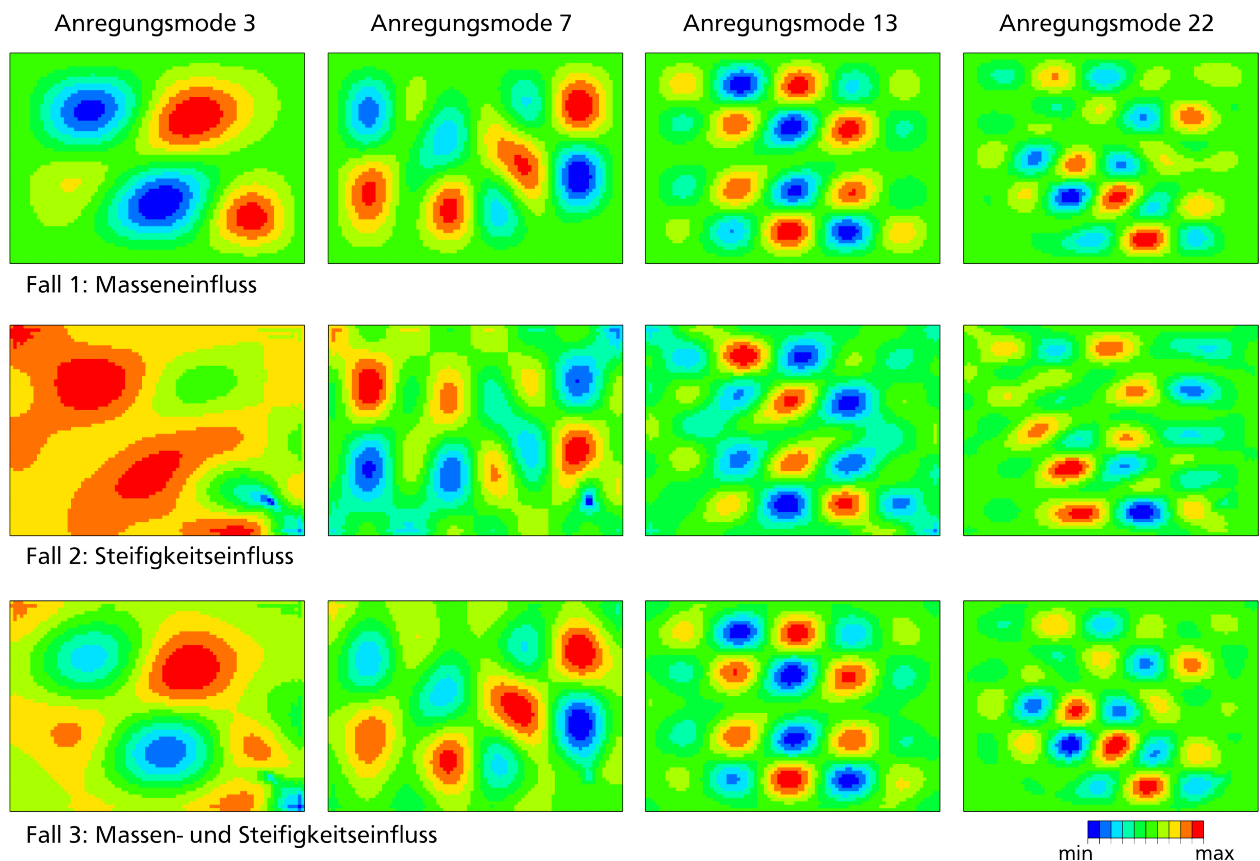


Abbildung 5.4: qualitative ERP-Skalarfelder der Platte in den Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 für alle drei Modifikationsfälle

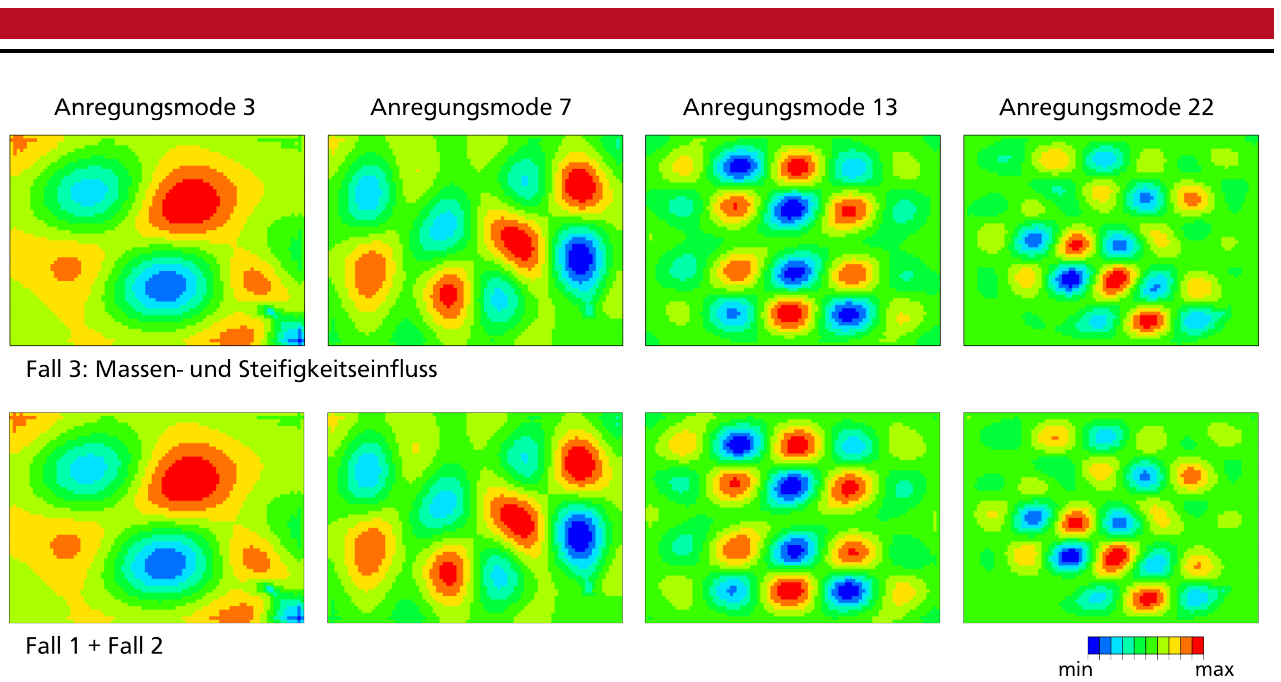


Abbildung 5.5: qualitative ERP-Skalarfelder der Platte in den Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 für den Modifikationsfall 3 sowie für die Summe der beiden Modifikationsfälle 1 und 2

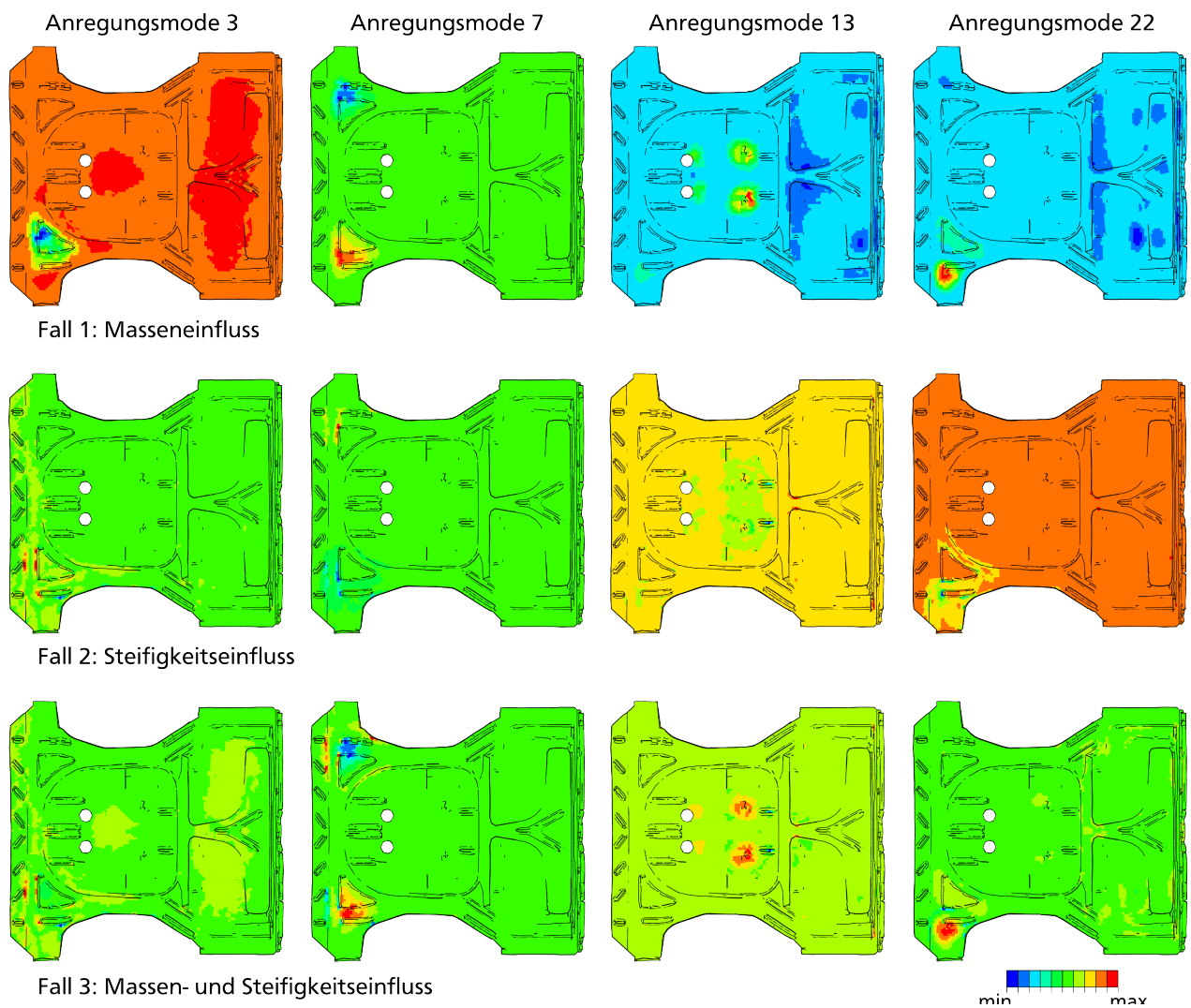


Abbildung 5.6: qualitative ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens in den Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 für alle drei Modifikationsfälle

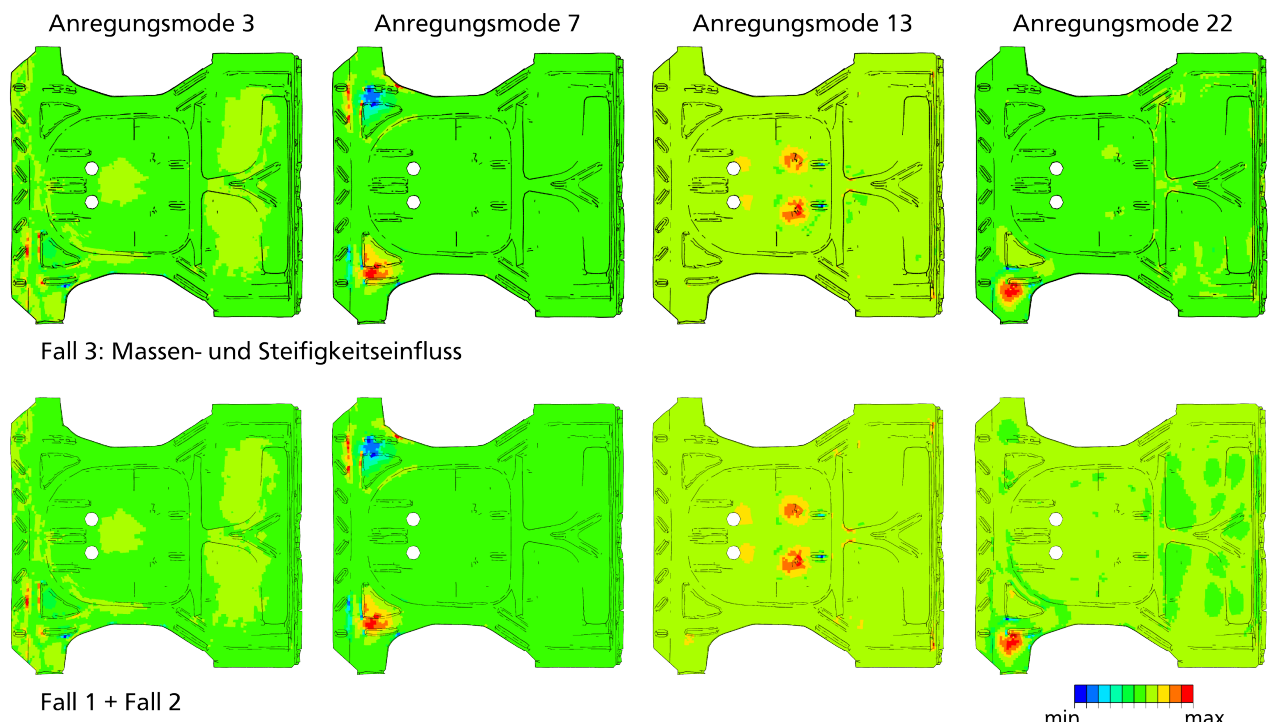


Abbildung 5.7: qualitative ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens in den Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 für den Modifikationsfall 3 sowie für die Summe der beiden Modifikationsfälle 1 und 2

Die quantitative, vollständige Übersicht der ERP-Skalarfelder (Pegeldifferenzdarstellung mit Angabe der ERP-Pegel der Basismodelle) aller Anregungsmoden ist für die Platte in den Abbildungen A.13–A.15 und für den Gepäckraumboden in den Abbildungen A.16–A.19 im Anhang zu finden.

Für beide Basismodelle unterscheiden sich die resultierenden ERP-Skalarfelder für jede Anregungsmoden voneinander. Dieses Verhalten war zu erwarten, da sich auch das Strukturverhalten der Modelle mit der Anregungsfrequenz ändert. Mit steigender Anregungsfrequenz nimmt bei der Platte die Anzahl lokaler Minima- und Maxima-Bereiche im gesamten Strukturbereich zu, so wie es tendenziell auch bei der Betriebsschwingform der Fall ist (siehe Abbildungen A.1–A.3 im Anhang). Beim Gepäckraumboden treten lokale Minima- und Maxima-Bereiche dagegen nicht verteilt über den gesamten Strukturbereich auf, sondern sind – ebenso wie die lokalen Minima und Maxima der Betriebsschwingform (siehe Abbildungen A.4–A.7 im Anhang) – lokal begrenzt. Für die einzelnen Anregungsmoden unterscheiden sich auch die ERP-Skalarfelder der drei Modifikationsfälle voneinander, wobei die Unterschiede beim Gepäckraumboden wesentlich größer sind. Bei der Platte ähneln sich die rein massenbasierten ERP-Skalarfelder (Modifikationsfall 1) und die massen- und steifigkeitsbasierten ERP-Skalarfelder (Modifikationsfall 3) mit steigender Anregungsmoden zunehmend. Der Masseneinfluss ist im Modifikationsfall 3 damit dominierend beim Plattenmodell.

Die Summen der rein massen- oder steifigkeitsbasierten ERP-Skalarfelder von Platte und Gepäckraumboden gleichen visuell den ERP-Skalarfeldern des Modifikationsfalls 3 sehr stark, mit Ausnahme der Anregungsmoden 22 beim Gepäckraumboden. Zur besseren Darstellung der Unterschiede oder Ähnlichkeiten der verschiedenen ERP-Skalarfelder werden die Korrelationen der ERP-Pegeldifferenzen der Modifikationsfälle 1 und 2 sowie die Summen der ERP-Pegeldifferenzen beider Modifikationsfälle mit den ERP-Pegeldifferenzen des Modifikationsfalls 3 gemäß Gleichung (3.7) berechnet. Die Korrelationen sind in Abbildung 5.8 über der Anregungsmoden aufgetragen. Links sind die Ergebnisse für

die Platte und rechts für den Gepäckraumboden zu sehen. Korrelationswerte von 1 und -1 bedeuten, dass die jeweiligen ERP-Skalarfelder mit denen von Modifikationsfall 3 identisch bzw. invers identisch sind, und Werte von 0 heißen, dass keine Ähnlichkeit zwischen den Skalarfeldern besteht.

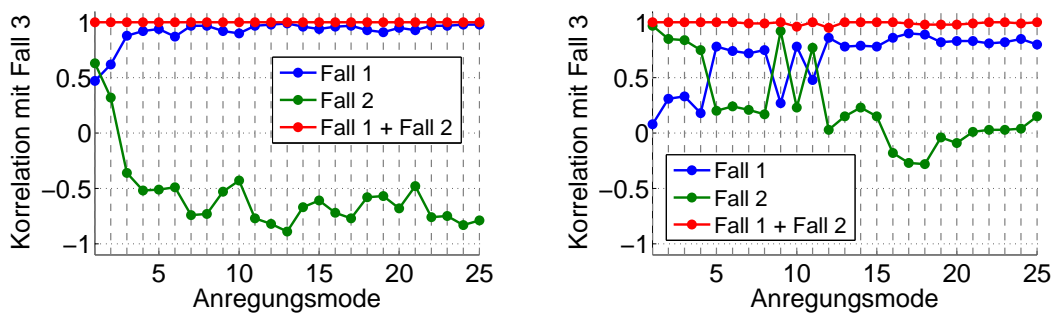


Abbildung 5.8: Korrelation der ERP-Skalarfelder der Modifikationsfälle 1 und 2 sowie ihrer Summen mit denen des Modifikationsfalls 3 für die Platte (links) und den Gepäckraumboden (rechts)

Beim Plattenmodell fällt auf, dass der Masseneinfluss (Modifikationsfall 1) durchgängig eine positive und der Steifigkeitseinfluss (Modifikationsfall 2) größtenteils eine negative Korrelation mit Modifikationsfall 3 aufweisen. Diese Gegenläufigkeit ist auch in Abbildung 5.4 zu erkennen: Die Minima- und Maxima-Bereiche in beiden Modifikationsfällen sind tendenziell entgegengesetzt angeordnet. Die Korrelationswerte zeigen, dass auch beim Gepäckraumboden der Masseneinfluss im Modifikationsfall 3 in den höheren Anregungsmoden dominant ist, da der Betrag des Korrelationswerts von Modifikationsfall 1 ab Anregungsmodus 12 höher ist als beim Modifikationsfall 2. Die Korrelationen zwischen den rein steifigkeitsbasierten ERP-Skalarfeldern und den massen- und steifigkeitsbasierten ERP-Skalarfeldern weisen beim Gepäckraumboden dagegen entweder einen hohen positiven Wert oder einen Wert nahe Null auf. Zudem ist auch beim Gepäckraumboden ein gegenläufiges Verhalten zwischen Massen- und Steifigkeitsdominanz auf die massen- und steifigkeitsbasierten ERP-Skalarfelder zu erkennen: Sinkt der Korrelationswert des einen Einflusses, so steigt der des anderen an und umgekehrt. Die Korrelation zwischen den Summen der ERP-Pegeldifferenzen der Modifikationsfälle 1 und 2 und den ERP-Pegeldifferenzen des Modifikationsfalls 3 ist sowohl bei der Platte als auch beim Gepäckraumboden für alle Anregungsmoden nahezu 1. Das zeigt, dass die Unterschiede in der Anregungsmodus 22 beim Gepäckraumboden hauptsächlich visueller Natur sind und durch die begrenzte Anzahl an Farben in der Farbskala verursacht sind. Die getrennte Analyse des Einflusses von Masse und Steifigkeit auf die ERP lässt sich dementsprechend sehr gut superponieren.

Den qualitativen Verläufen der ERP-Skalarfelder in den Abbildungen 5.4 und 5.6 kann nicht entnommen werden, in welche Richtung sich die ERP-Pegel – Erhöhung oder Reduktion – der einzelnen Modelle aufgrund der Modifikation verändert haben. Es stellt sich daher die Frage, ob es überhaupt Strukturbereiche gibt, in denen die ERP durch die Modifikationen gesenkt werden konnte, und, falls ja, wie groß diese Bereiche bezogen auf die gesamte Modellfläche sind. Die Antwort auf diese Frage ist in Abbildung 5.9 zu sehen. Darin ist für alle drei Modifikationsfälle, links für die Platte und rechts für den Gepäckraumboden, der prozentual auf die Gesamtfläche der Basismodelle bezogene Flächenanteil mit einer negativen Pegeldifferenz der ERP über der Anregungsmodus zu sehen.

Bei der Platte beträgt der Flächenanteil mit einer negativen Pegeldifferenz der ERP ab der Anregungsmodus 3 ca. 50 %. Dementsprechend führt ungefähr die Hälfte der Modifikationen zu einer ERP-

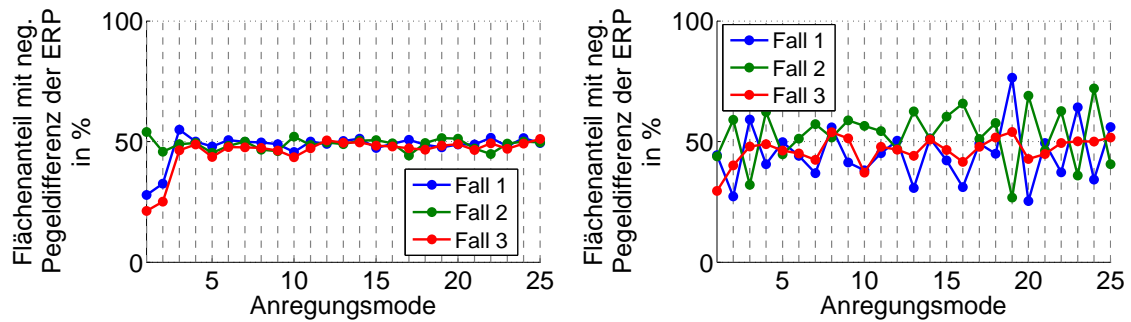


Abbildung 5.9: prozentuale Flächenanteile mit einer negativen Pegeldifferenz der ERP für alle drei Modifikationsfälle in den einzelnen Anregungsmoden für die Platte (links) und den Gepäckraumboden (rechts)

Reduktion und die andere Hälfte zu einer ERP-Erhöhung. Beim Gepäckraumboden bewegt sich der Flächenanteil mit einer negativen Pegeldifferenz der ERP auch im Bereich von 50 %, schwankt aber zwischen den Anregungsmoden deutlich stärker. Zudem verhalten sich die Schwankungen der beiden Modifikationsfälle Nr. 1 und Nr. 2 um den Flächenanteil von 50 % genau gegenläufig: In Anregungsmoden, in denen deutlich mehr als die Hälfte der masseerhöhenden Modifikationen zu einer Reduktion der ERP führen, erzielen nur deutlich weniger als die Hälfte der steifigkeitserhöhenden Modifikationen eine ERP-Reduktion und umgekehrt. Sowohl Platte als auch Gepäckraumboden weisen jedenfalls für jede Anregungsmode Strukturbereiche auf, in denen eine Modifikation zu einer Absenkung der ERP führt. Eine weitere Frage, die sich stellt, betrifft die Größenordnung der ERP-Reduktion bezogen auf die der ERP-Erhöhung. Zur Beantwortung dieser Frage ist in Abbildung 5.10 das Verhältnis der maximalen Reduktion der ERP-Pegel und der maximalen Erhöhung der ERP für jede Anregungsmode aufgetragen. Links sind die Verhältnisse für die Platte und rechts für den Gepäckraumboden zu sehen – jeweils für alle drei Modifikationsfälle.

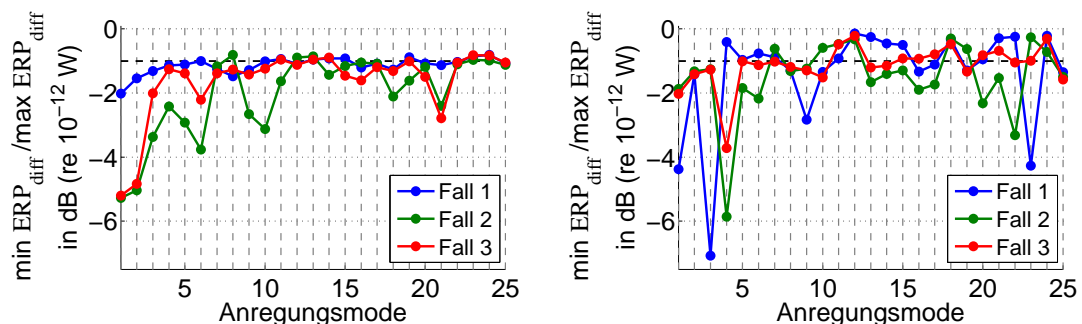


Abbildung 5.10: Verhältnis der minimal und maximal erzielten Änderungen der ERP-Pegel für alle drei Modifikationsfälle in den einzelnen Anregungsmoden für die Platte (links) und den Gepäckraumboden (rechts)

Die gestrichelte schwarze Linie bei -1 markiert die Grenze, bei der sich Reduktion und Erhöhung der ERP-Pegel betragsmäßig gleichen. Werte kleiner -1 bedeuten, dass die maximal erzielte Reduktion der ERP-Pegel größer ist als die Erhöhung der ERP-Pegel. Umgekehrt bedeuten Werte zwischen -1 und 0 , dass die maximale Pegelerhöhung größer ist. Bei der Platte ist die erzielte Reduktion der ERP-Pegel in den meisten Anregungsmoden größer als die Erhöhung der ERP-Pegel. Alle Punkte, die sich oberhalb der Grenze von -1 befinden, liegen zudem deutlich näher an der -1 als an der 0 . Das bedeutet, dass bei der Platte in keiner Anregungsmode die maximale Pegelreduktion klein ist im

Vergleich zur maximalen Pegelerhöhung. Beim Gepäckraumboden schwanken die Verhältnisse um die Grenze von -1 . Es gibt sowohl Anregungsmoden, in denen die maximal erzielte Reduktion der ERP-Pegel klein im Verhältnis zur maximal erzielten Erhöhung der ERP-Pegel ist als auch umgekehrt. Im nächsten Schritt der Modellmodifizierung mit großflächigeren Modifikationen anhand der einzelnen ERP-Skalarfelder wird sich zeigen, ob die so erzielbaren Änderungen der ERP-Pegel abhängig von diesen Charakteristiken – Verhältnis der minimalen und maximalen Änderungen der ERP-Pegel und Flächenanteil negativer Pegeldifferenz der ERP – der ERP-Skalarfelder sind.

5.3 Positionierung von Modifikationen auf Basis unterschiedlich erzeugter ERP-Skalarfelder.

Die ERP-Skalarfelder werden nun als „Landkarten“ genutzt, um Modifikationen auf den Basismodellen zu positionieren. Ziel dieser Strukturänderungen ist es, die ERP – je nach Wahl der Modifikationsposition – gezielt zu reduzieren oder auch zu erhöhen. Die Positionierung der Modifikationen für eine Reduktion oder Erhöhung orientiert sich an den Minima bzw. Maxima der ERP-Skalarfelder.

Beide Basismodelle werden nacheinander anhand der ERP-Skalarfelder der drei Modifikationsfälle verändert, um den Einfluss einer Massen- und Steifigkeitsänderung sowohl separat als auch gemeinsam zu untersuchen. Die reinen Massen- und Steifigkeitserhöhungen werden anhand der ERP-Skalarfelder der Modifikationsfälle 1 bzw. 2 positioniert. Anschließend werden Masse und Steifigkeit anhand der ERP-Skalarfelder des Modifikationsfalls 3 gemeinsam erhöht. Das methodische Vorgehen zur Selektion der Elemente, auf denen die Modifikationen platziert werden, ist in allen drei Fällen und auch bei beiden Basismodellen identisch. Die Selektion der Elemente erfolgt zudem analog zur Selektionsvariante 1 der Flussdichte-basierten Strukturmodifikation in Abschnitt 4.2.2: Für eine vorgegebene prozentuale Größe der Modifikationsfläche (Grenzwert) werden diejenigen Elemente mit den niedrigsten oder höchsten ERP-Pegeln selektiert, die in Summe der vorgegebenen Fläche entsprechen. Für jede Anregungsmoden werden somit auch hier separate Modelle anhand der jeweiligen ERP-Skalarfelder erstellt. Die jeweilige Anregungsmoden wird daher auch in diesem Fall als Auslegungsmoden bezeichnet. Anhand der ERP-Skalarfelder wird für jede Auslegungsmoden nicht nur ein Modell, sondern es werden zwei Modelle erstellt: je ein Modell für die Ziele der ERP-Reduktion und der ERP-Erhöhung. Abbildung 5.11 zeigt exemplarisch für die Platte die resultierenden Modifikationsflächen in den Auslegungsmoden 8 und 9 bei einem Grenzwert von 5 %.

Die resultierenden Modelle werden im Folgenden $ERP_{\min, X \%, n}$ und $ERP_{\max, X \%, n}$ genannt, wobei X den Grenzwert für die Flächengröße und n die Auslegungsmoden angibt. Die Größe der Modifikationsfläche wird auch bei diesen Untersuchungen variiert. Die untersuchten Grenzwerte, die sich jeweils auf die Gesamtfläche A_{ges} der Basismodelle beziehen, können Tabelle 5.2 entnommen werden.

Tabelle 5.2: Grenzwerte für die Elementauswahl anhand der minimalen und maximalen ERP

Selektionsgröße	Bezugsgröße	Grenzwerte in %	Modellname
minimale ERP	A_{ges}	0,1; 1; 5; 10; 20	$ERP_{\min, X \%, n}$
maximale ERP	A_{ges}	0,1; 1; 5; 10; 20	$ERP_{\max, X \%, n}$

Für alle drei Modifikationsfälle – die reine Massenerhöhung, die reine Steifigkeitserhöhung und die gemeinsame Erhöhung von Masse und Steifigkeit – werden unterschiedliche Einstellungen für die beiden Materialparameter Dichte und Elastizitätsmodul sowie die Skindicke der Modifikationen un-

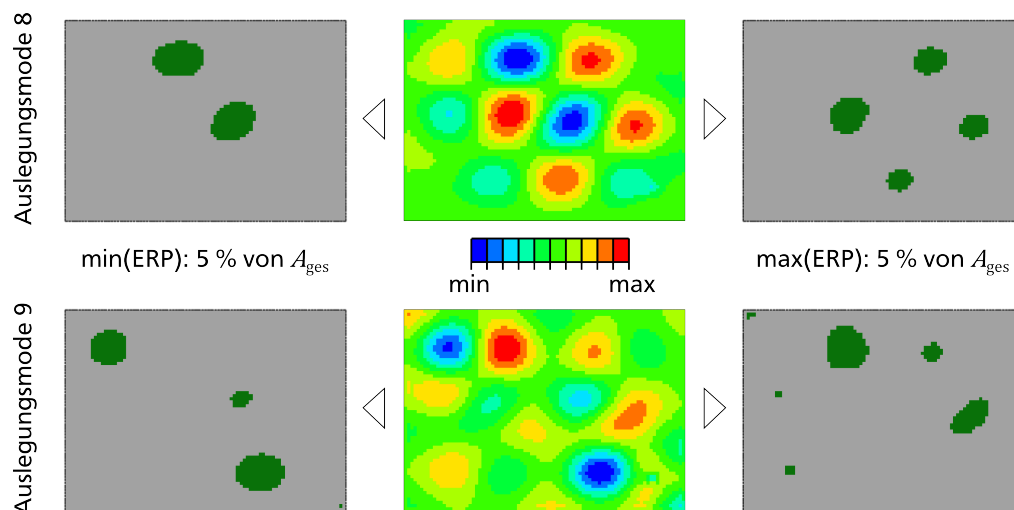


Abbildung 5.11: Beispiel für die ERP-basierte Selektion der Orte (FE-Elemente) für eine Modifikation bei einer prozentualen Begrenzung der Modifikationsfläche von 5 %; links: Selektion anhand minimaler ERP-Pegel, rechts: Selektion anhand maximaler ERP-Pegel

tersucht. Die gewählten Modifikationseinstellungen sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Die freigelassenen Einträge gehören zu Größen, die bei den jeweiligen Einstellungen sowohl abhängig vom Basismodell als auch von den Grenzwerten sind. Eine Übersicht dieser Werte ist für die beiden Modelle Platte und Gepäckraumboden in den Tabellen A.8 bzw. A.9 im Anhang zu finden.

Tabelle 5.3: Angabe der konstant gehaltenen Größen mit ihren Werten in den Modifikationseinstellungen für alle drei Modifikationsfälle für Platte und Gepäckraumboden (GB)
(frei gelassene Einträge sind in den Tabellen A.8–A.9 im Anhang zu finden)

Fall-Nr.	Nr.	Dicke in mm (Platte / GB)	Masse in kg	Dichte in kg/m ³	Elastizitätsmodul in N/m ² (Platte / GB)
Fall 1	1	5 / 0,705	1		0,0001
	2	5 / 0,705	0,5		0,0001
	3	5 / 0,705	0,1		0,0001
	4	5 / 0,705		7850	0,0001
	5	2,5 / 0,3525		7850	0,0001
Fall 2	4	5 / 0,705	0	0	$2,04 \cdot 10^{11} / 2,1 \cdot 10^{11}$
	5	2,5 / 0,3525	0	0	$2,04 \cdot 10^{11} / 2,1 \cdot 10^{11}$
Fall 3	1	5 / 0,705	1		
	2	5 / 0,705	0,5		
	3	5 / 0,705	0,1		
	4	5 / 0,705		7850	$2,04 \cdot 10^{11} / 2,1 \cdot 10^{11}$
	5	2,5 / 0,3525		7850	$2,04 \cdot 10^{11} / 2,1 \cdot 10^{11}$

Die fünf untersuchten Modifikationseinstellungen gleichen für den Modifikationsfall 3 denen der Strukturmodifikationen anhand der Flussdichte der STI in Abschnitt 4.2.2. In den Modifikationseinstellungen 1–3 wird die Masse der Modifikation für alle Grenzwerte auf unterschiedlichen Werten konstant gehalten; Dichte und Elastizitätsmodul passen sich entsprechend der Modifikationsfläche an. Bei den Modifikationseinstellungen 4 und 5 werden dagegen wieder die Materialparameter konstant gelassen, was zu unterschiedlichen Massen bei den verschiedenen Grenzwerten für die Flächenvorgabe

führt. Diese Untersuchung wird für zwei verschiedene Dicken der Skin-Modifikationen durchgeführt (gleiche und halbe Dicke wie die der Struktur des jeweiligen Basismodells). Die fünf Modifikationseinstellungen für Fall 1 ähneln denen von Fall 3, unterscheiden sich aber in der Tatsache, dass der Wert für den Elastizitätsmodul überall auf den konstanten Wert von $0,0001 \text{ N/m}^2$ gesetzt wird, damit durch die Modifikation nur die Masse erhöht wird. Wie auch bei der Erstellung der ERP-Skalarfelder des reinen Masseneinflusses kann der Elastizitätsmodul FE-bedingt nicht auf exakt Null gesetzt werden. Beim Modifikationsfall 2 wird nur der Steifigkeitseinfluss untersucht, weshalb die Dichte der Skin-Modifikation für alle Untersuchungen zu Null gesetzt wird. Die Vorgabe einer konstanten Masse ist daher nicht möglich und so entfallen die Modifikationseinstellungen 1–3.

Nacheinander werden nun in den Abschnitten 5.3.1–5.3.3 die Einflüsse der reinen Massenerhöhung, der reinen Steifigkeitserhöhung und der gleichzeitigen Erhöhung von Masse und Steifigkeit auf die ERP anhand ausgewählter Ergebnisdarstellungen gezeigt. In der Ergebnisauswertung liegt der Fokus auf den gezielten ERP-Reduktionen, weswegen diese Untersuchungen stärker analysiert werden als die Untersuchungen zu den gezielten ERP-Erhöhrungen.

5.3.1 Massenerhöhungen

Zunächst werden in Abbildung 5.12 die Ergebnisse der Plattenmodelle $\text{ERP}_{\max, X \%, 1 \dots 25}$ (oben) und $\text{ERP}_{\min, X \%, 1 \dots 25}$ (unten) gemeinsam für die beiden Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) (Masse konstant bei 1 kg bzw. 0,1 kg) betrachtet. Aufgetragen sind jeweils die Pegeldifferenzen zwischen den ERP-Pegeln der modifizierten Modelle in ihrer Auslegungsmode und den ERP-Pegeln des Basismodells in der entsprechenden Anregungsmode. Werte größer oder kleiner Null bedeuten, dass die Modifikationen zu einer Erhöhung bzw. einer Reduktion der ERP-Pegel im Vergleich zum Basismodell führen. Analog zur Darstellung der Modifikationsergebnisse der STI-basierten Modifikationen in Abschnitt 4.2.3 sind die Punkte der modifizierten Modelle gleichen Grenzwerts nicht durch eine Linie miteinander verbunden – wie es beim Basismodell der Fall ist –, um zu verdeutlichen, dass es sich in jeder Auslegungsmode um ein eigenes Modell handelt.

Die Mehrheit der Plattenmodelle $\text{ERP}_{\max, X \%, 1 \dots 25}$ führt unabhängig vom Grenzwert und von der Modifikationsmasse zur erwünschten Erhöhung der ERP-Pegel. Ebenso führt die Mehrheit der Plattenmodelle $\text{ERP}_{\min, X \%, 1 \dots 25}$ unabhängig vom Grenzwert und von der Modifikationsmasse zur erwünschten Reduktion der ERP-Pegel. Ein weiterer Vergleich der maximal erzielten Pegeldifferenzen der Plattenmodelle $\text{ERP}_{\max, X \%, 1 \dots 25}$ und $\text{ERP}_{\min, X \%, 1 \dots 25}$ in Abbildung 5.12 zeigt, dass die Reduktionen der ERP-Pegel insgesamt größer ausfallen als die Erhöhungen. Sowohl bei den Modellen $\text{ERP}_{\max, X \%, 1 \dots 25}$ als auch den Modellen $\text{ERP}_{\min, X \%, 1 \dots 25}$ fallen die Pegeländerungen der ERP in den meisten Auslegungsmoden mit abnehmender Modifikationsmasse kleiner aus. Während bei einer Modifikationsmasse von 1 kg (links) bspw. viele der Modelle $\text{ERP}_{\min, X \%, 1 \dots 25}$ eine Reduktion der ERP-Pegel um 5–20 dB erzielen, erreichen bei einer Massenerhöhung um 0,1 kg (rechts) die meisten dieser Modelle nur noch eine Reduktion um weniger als 10 dB. Die Reduktionen bei 0,5 kg liegen meist dazwischen. Allerdings ist die erreichte Reduktion der ERP-Pegel bei 0,1 kg beachtenswert, wenn ein Vergleich mit den erzielten Pegelreduktionen basierend auf der STI in Abschnitt 4.2.3 angestellt wird. Für diesen Vergleich ist in Abbildung 5.13 ein vergrößerter Ausschnitt der Pegeldifferenzen der ERP der Plattenmodelle $\text{ERP}_{\min, X \%, 1 \dots 25}$ bei einer Modifikationsmasse von 0,1 kg zu sehen.

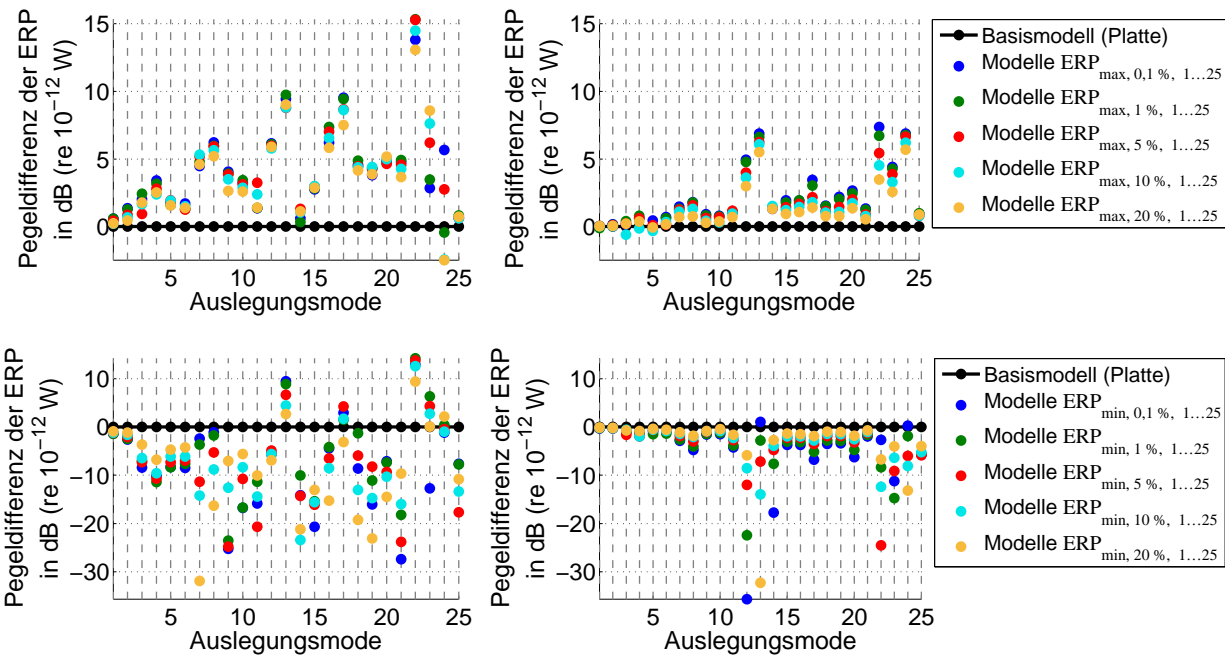


Abbildung 5.12: Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ (oben) und $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ (unten) bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) bei Untersuchung des Masseneinflusses

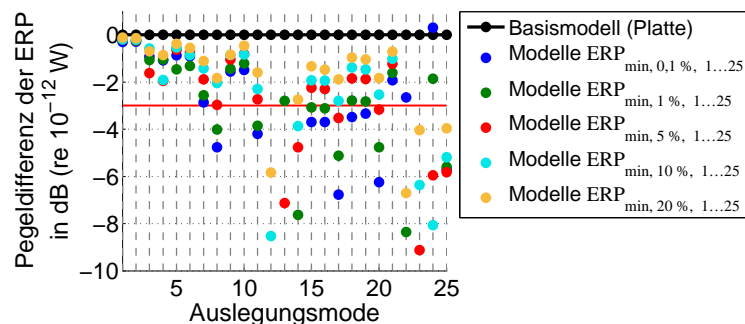


Abbildung 5.13: Ausschnitt der Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 3 bei Untersuchung des Masseneinflusses

Es zeigt sich, dass mit 0,1 kg leichten Modifikationen an Positionen basierend auf den ERP-Skalarfeldern ähnliche bis höhere ERP-Reduktionen bewirkt werden können als mit 1 kg schweren Modifikationen an Positionen basierend auf der Flussdichte der STI, vergleiche Abbildung 4.13. Es sollte an dieser Stelle berücksichtigt werden, dass die Modifikationen basierend auf der STI nicht nur die Masse, sondern auch die Steifigkeit erhöht haben. Ein entsprechender Vergleich wird daher bei der noch folgenden Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses in Abschnitt 5.3.3 wiederholt. Anhand des vergrößerten Ausschnitts in Abbildung 5.13 ist weiterhin gut zu erkennen, dass in den meisten Auslegungsmoden die Reduktionen der ERP-Pegel umso größer ausfallen, je kleiner der Grenzwert X ist. Ein kleinerer Grenzwert bedeutet, dass die Modifikationsfläche kleiner ist und damit die Masse lokal konzentrierter auf der Struktur aufgebracht ist. In einigen Auslegungsmoden (13, 17, 22–24) wird mit einer Masse von 1 kg bei keinem Grenzwert oder zumindest nicht bei allen Grenzwerten eine Reduktion der ERP-Pegel erreicht, siehe links unten in Abbildung 5.12. In genau diesen Auslegungsmoden kommt es dagegen zu verhältnismäßig hohen Pegelreduktionen bei der kleineren Masse von nur 0,1 kg. Somit lässt sich zunächst festhalten, dass die ideale Masse, die auf der Struktur

aufgebracht werden sollte, um die ERP maximal zu senken, abhängig von der Frequenz ist. Um es plakativ auszudrücken: Nicht in allen Auslegungsmoden gilt die Regel „viel hilft viel“, sondern manchmal ist „weniger tatsächlich mehr“.

Abbildung 5.14 zeigt die Ergebnisse der gleichen Untersuchungen, die Abbildung 5.12 zugrunde liegen, für den Gepäckraumboden.

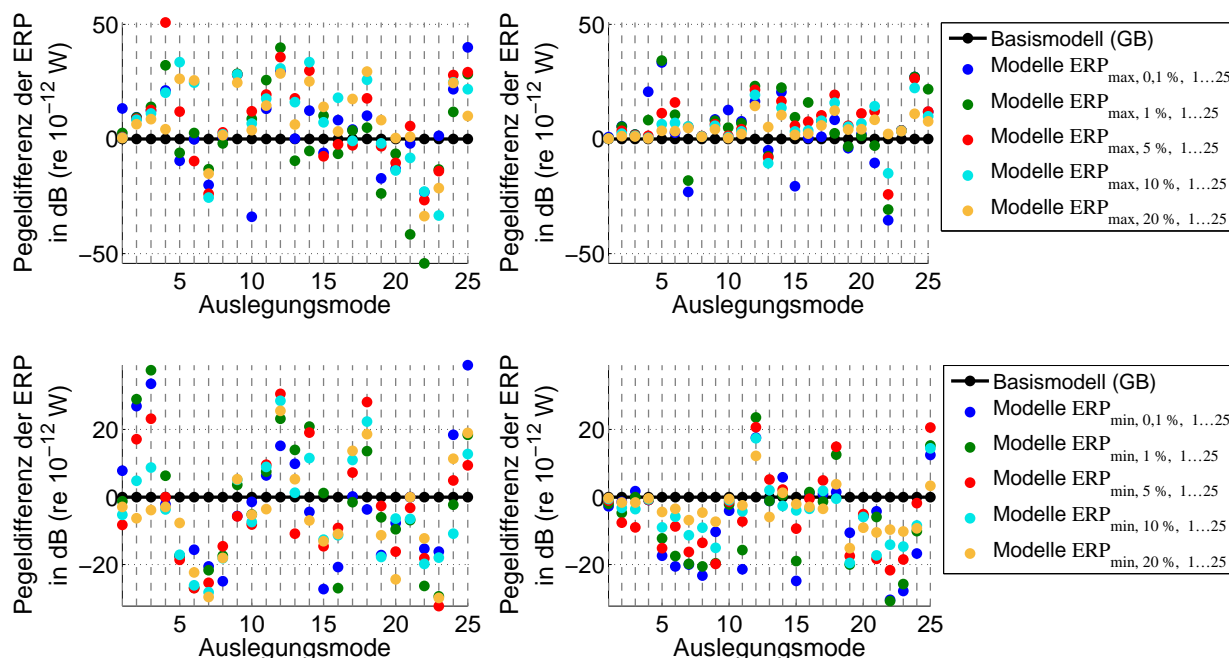


Abbildung 5.14: Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ (oben) und $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ (unten) bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) bei Untersuchung des Masseneinflusses

Beim Gepäckraumboden zeigt sich auf den ersten Blick ein gegenteiliges Bild im Vergleich zur Platte. Bei einer Modifikationsmasse von 1 kg entsprechen die Ergebnisse nicht den Erwartungen, da die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ in vielen Auslegungsmoden für viele Grenzwerte keine Erhöhungen der ERP-Pegel und die Modelle $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ dagegen keine Reduktionen der ERP-Pegel bewirken. Dagegen zeigt sich, dass die kleinere Modifikationsmasse von nur 0,1 kg in den meisten Auslegungsmoden zu den erwarteten Pegelerhöhungen bzw. Pegelreduktionen führt und somit insgesamt gesehen eine bessere Auswirkung hat als die höhere Masse. Im Vergleich zu den Plattenmodellen $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ fallen beim Gepäckraumboden viele Reduktionen der ERP-Pegel bei einer Masse von 0,1 kg deutlich höher aus (–3 bis –20 dB) und können damit sogar als nennenswert eingestuft werden. Bei dieser Modifikationsmasse zeigt sich wie auch bei der Platte – aber im Gegensatz zur höheren Masse von 1 kg –, dass die Pegelreduktionen mit kleinerem Grenzwert und damit konzentrierterer Masse größer werden. In einigen Auslegungsmoden (12–14, 16–18 und 25) können allerdings auch bei 0,1 kg für keinen oder nur für wenige Grenzwerte Reduktionen der ERP-Pegel erzielt werden. Aus diesem Grund wird zusätzlich zu den geplanten Modifikationseinstellungen eine Variante mit einer verringerten Modifikationsmasse von nur 0,01 kg berechnet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 5.15 zu sehen.

Während die Reduktionen der ERP-Pegel in allen vorher nicht problematischen Auslegungsmoden geringer ausfallen, können in den Auslegungsmoden 13, 14, 16–18 und 25 Pegelreduktionen – größ-

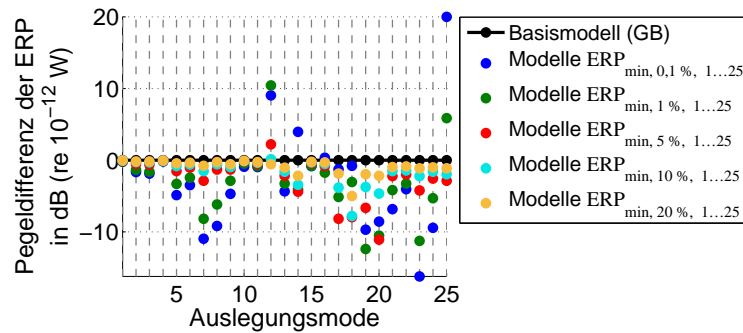


Abbildung 5.15: Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ bzgl. des Basismodells für eine Modifikationsmasse von 0,01 kg bei Untersuchung des Masseneinflusses

tenteils sogar nennenswerte Reduktionen der ERP-Pegel von mehr als 3 dB – festgestellt werden. Eine Ausnahme stellt die Auslegungsmode 12 dar. In dieser kann auch mit einer Masse von 0,01 kg nur für den Grenzwert der Modifikationsfläche von 20 % eine Reduktionen der ERP-Pegel erzielt werden und diese ist mit 0,6 dB sehr klein.

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse der beiden Modifikationseinstellungen Nr. 4 und Nr. 5 untersucht, bei denen die hinzugefügte Masse mit zunehmender Modifikationsgröße ebenfalls zunimmt, da die Materialdicke konstant gehalten wird. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Modifikationseinstellungen Nr. 4 (Skindicke = Basismodell Dicke) und Nr. 5 (Skindicke = Basismodell Dicke/2) sind links bzw. rechts in Abbildung 5.16 für die Plattenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ (oben) und $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ (unten) zu sehen.

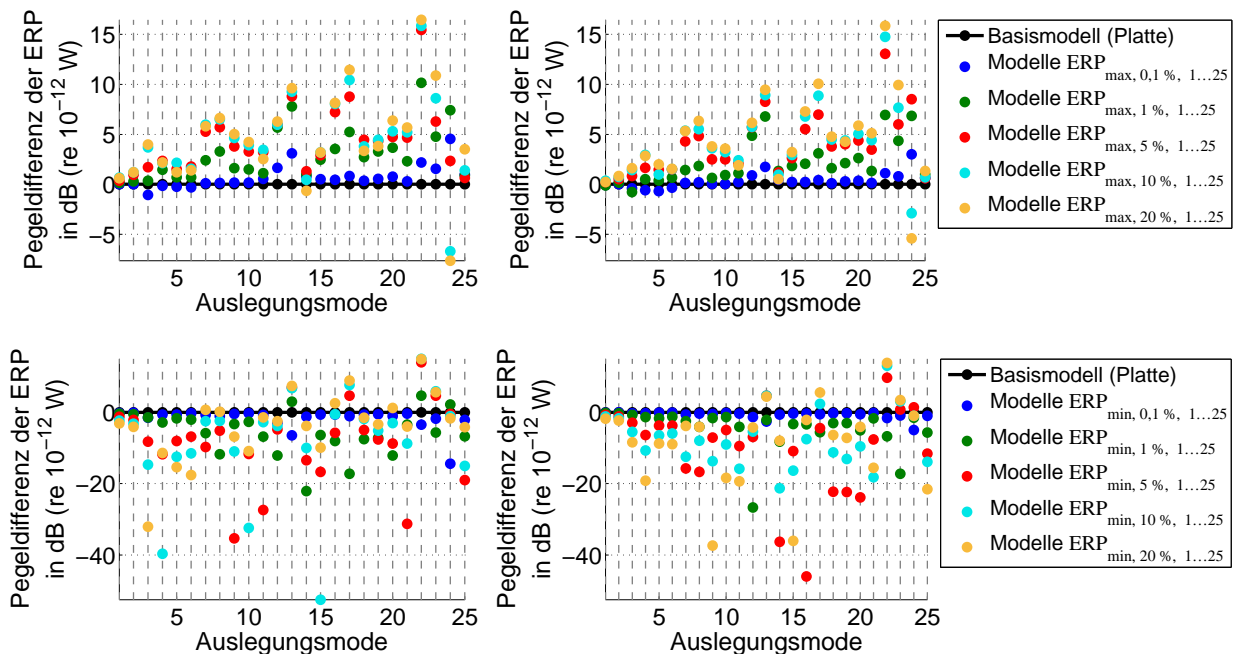


Abbildung 5.16: Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ (oben) und $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ (unten) bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4 (links) und Nr. 5 (rechts) bei Untersuchung des Masseneinflusses

Es fällt auf, dass die Unterschiede in den erzielten Änderungen der ERP-Pegel sowohl für die Modelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ als auch $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ zwischen beiden Modifikationsdicken insgesamt nicht sehr groß sind, obwohl zwischen den resultierenden Massen bei gleichem Grenzwert immer der Faktor 2

liegt. Im Falle der Modelle $ERP_{\max, X\%, 1...25}$ wächst bei beiden Modifikationsdicken die Erhöhung der ERP-Pegel in fast allen Auslegungsmoden mit steigender Modifikationsfläche und -masse (steigender Grenzwert). Bei den Modellen $ERP_{\min, X\%, 1...25}$ wächst die Reduktion der ERP-Pegel ebenfalls in einigen Auslegungsmoden mit steigendem Grenzwert, aber es ist auch ein anderer Trend zu erkennen. Beispielhaft hierfür können die Auslegungsmoden 18–20 betrachtet werden: Während zunächst der Anstieg von Masse und Fläche von einem Grenzwert von 0,1 % auf 5 % für eine deutliche Steigerung der erzielbaren Pegelreduktion sorgt, bewirkt eine weitere Erhöhung von Masse und Fläche bei den Grenzwerten 10 % und 20 % wieder eine zunehmende Verringerung der Pegelreduktion. Dieses Verhalten zeigt, dass es in Abhängigkeit von der Frequenz eine optimale Modifikationsgröße und/oder -masse gibt. Ob die Verschlechterung der Reduktion der ERP-Pegel ausgehend vom Optimum in die eine oder die andere Richtung auf eine zu kleine oder zu große Fläche oder eine zu kleine oder zu große Masse zurückzuführen ist, lässt sich anhand der Abbildung 5.16 nicht klären, da die dort gezeigten Einflüsse von Masse und Fläche nicht separiert werden können. Werden die Ergebnisse der Modifikationseinstellungen Nr. 1 und Nr. 3 aus Abbildung 5.12 hinzugenommen, zeigt sich aber, dass Masse und Fläche eine gleichermaßen wichtige Rolle spielen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei einer zu groß oder zu klein gewählten Masse (z. B. in Auslegungsmoden 12 bei 1 kg bzw. in Auslegungsmoden 19 bei 0,1 kg) der Einfluss einer Flächenänderung der Modifikation für diese Auslegungsmoden sehr gering ist. Wird die Masse dagegen passend(er) gewählt, so steigt der Flächeneinfluss stark an. Dies lässt sich bei Betrachtung der Anregungsmoden 12 und 19 bei den Massen 0,1 kg bzw. 1 kg erkennen.

Die Ergebnisse der Modifikationen unterschiedlicher Dicke bei konstanter Dichte (Modifikationseinstellungen Nr. 4 und Nr. 5) sind für die Gepäckraumbodenmodelle in analoger Weise in Abbildung 5.17 zu sehen.

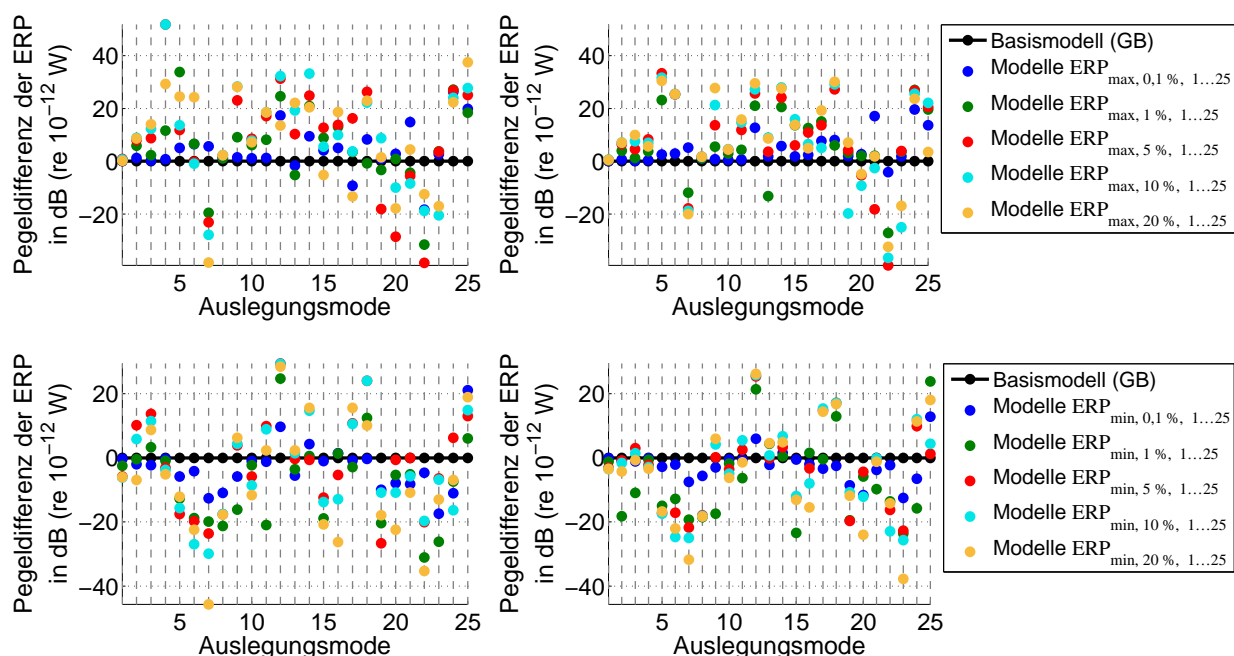


Abbildung 5.17: Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X\%, 1...25}$ (oben) und $ERP_{\min, X\%, 1...25}$ (unten) bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4 (links) und Nr. 5 (rechts) bei Untersuchung des Masseneinflusses

Im Großen und Ganzen ähneln die Ergebnisse dieser Untersuchung denen an der Platte hinsichtlich der Auswirkung eines zunehmenden Grenzwertes auf die resultierende Änderung der ERP-Pegel: Entweder steigt die Pegeländerung mit zunehmendem Grenzwert kontinuierlich an oder es gibt einen Umkehrpunkt, ab dem wieder eine reduzierte Änderung der ERP-Pegel auftritt. Dies gilt sowohl für die Modelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ als auch $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$.

In einem letzten Schritt wird die Gültigkeit der modifizierten Modelle überprüft. Eine an die Modelle gestellte Anforderung lautet, dass die Strukturen durch die Modifikationen nur geringfügig verändert werden sollen, was anhand der Lage der Eigenfrequenzen zu bestimmen ist (siehe Abschnitt 1.3). Als Grenze hierfür wird zunächst eine maximal erlaubte Änderung von $\pm 10\%$ definiert. Exemplarisch für die Plattenmodelle werden in Abbildung 5.18 die Eigenfrequenzänderungen der Modelle aus Abbildung 5.12 gezeigt. Links sind die Eigenfrequenzänderungen der Modifikationseinstellung Nr. 1 (Masse 1 kg) und rechts der Modifikationseinstellung Nr. 3 (Masse 0,1 kg) für die beiden Grenzwerte 0,1 % (oben) und 20 % (unten) zu sehen, da diese die beiden Extremwerte darstellen. Dabei ist die Änderung der jeweils ersten 25 Eigenfrequenzen aller 50 Plattenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ und $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ gegenüber dem Basismodell in Form von Mittelwert und Standardabweichung dargestellt. Zudem sind die maximal auftretenden Änderungen (min./max. Änderung) für jede Eigenfrequenz eingezeichnet.

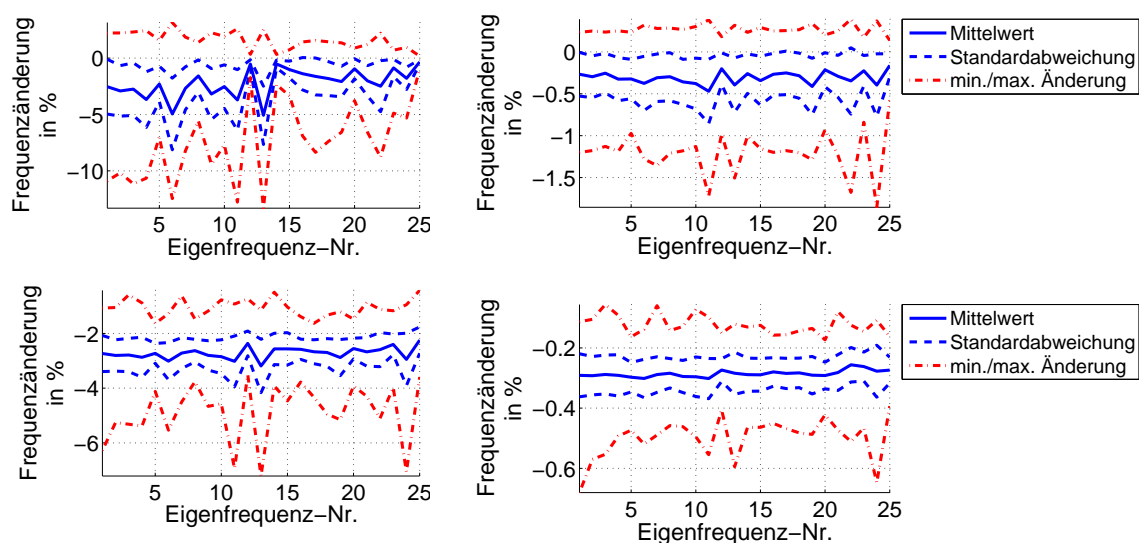


Abbildung 5.18: Eigenfrequenzänderungen der Plattenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ und $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ bzgl. des Basismodells bei den Grenzwerten 0,1 % (oben) und 20 % (unten) für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) bei Untersuchung des Masseneinflusses

Die Änderung der Eigenfrequenzen sinkt für die Modifikationseinstellungen Nr. 1–Nr. 3 zum einen mit zunehmendem Grenzwert und damit zunehmender Modifikationsfläche und zum anderen mit sinkender Modifikationsmasse. Gemessen am Mittelwert und an der Standardabweichung können alle Plattenmodelle der Modifikationseinstellungen Nr. 1–Nr. 3 als gültig angesehen werden, da die Werte im Bereich von $\pm 10\%$ liegen. Bei den kleineren Grenzwerten treten jedoch auch Modelle auf, in denen es Ausreißer-Eigenfrequenzen gibt, die sich um mehr als 10 % verschieben, was an den Verläufen der minimalen und maximalen Änderung abgelesen werden kann. Dass es sich um Ausreißer handelt, ist am Abstand zwischen diesen beiden Kurven und den beiden Kurven der Standardabweichung erkennbar: Dieser Abstand ist für alle Eigenfrequenzen größer als der doppelte Abstand

zwischen Mittelwert und Standardabweichung und im Bereich zwischen der doppelten Standardabweichung und dem Mittelwert liegen definitionsgemäß 95 % aller Modelle [73]. Insgesamt führt eine Massenerhöhung mehrheitlich zu Verringerungen der Eigenfrequenzen. Dies wird durch die Betrachtung (nicht gezeigt) der Eigenfrequenzänderungen bei den Modifikationseinstellungen Nr. 4 und Nr. 5 bestätigt. Dort steigt die Änderung der Eigenfrequenzen mit zunehmendem Grenzwert an, was plausibel ist, da in diesen Modellen mit zunehmendem Grenzwert auch die Modifikationsmasse ansteigt. Alle Modelle, die eine Modifikationsmasse deutlich größer als 1 kg besitzen, weisen so hohe Änderungen in den Eigenfrequenzen auf, dass sie im Rahmen der gestellten Anforderungen nicht gültig sind. Dabei handelt es sich um alle Modelle mit den Grenzwerten 10 % und 20 % bei der Modifikationseinstellung Nr. 4 sowie mit dem Grenzwert 20 % bei der Modifikationseinstellung Nr. 5.

Beim Gepäckraumboden sind deutlich mehr der untersuchten Modelle ungültig. Auch hier zeigt sich der gleiche Trend in den Eigenfrequenzänderungen wie bei der Platte. Die Eigenfrequenzen verschieben sich umso mehr, je größer die Modifikationsmasse wird. Bei gleicher Masse verschieben sich die Eigenfrequenzen umso mehr, je kleiner die Modifikationsfläche wird. Allerdings bewirken die gleichen Modifikationsmassen beim Gepäckraumboden größere Änderungen in den Eigenfrequenzen. Abbildung 5.19 zeigt die Eigenfrequenzänderungen der Gepäckraumbodenmodelle bei den Grenzwerten 0,1 % (oben) und 20 % (unten) für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts).

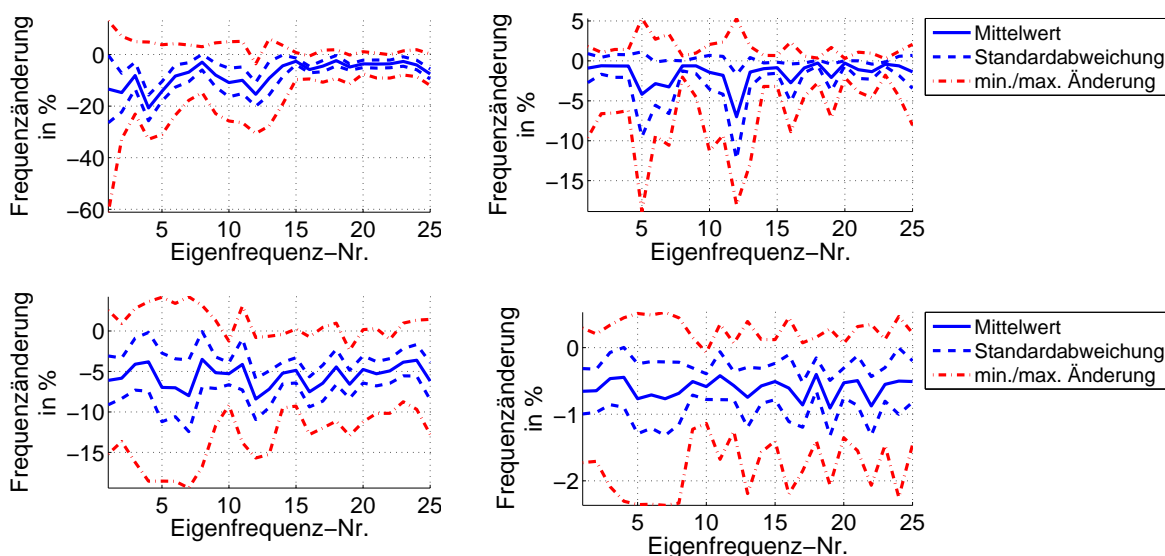


Abbildung 5.19: Eigenfrequenzänderungen der Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X \%}, 1...25$ und $ERP_{\min, X \%}, 1...25$ bzgl. des Basismodells bei den Grenzwerten 0,1 % (oben) und 20 % (unten) für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) bei Untersuchung des Masseneinflusses

Bei den Gepäckraumbodenmodellen schwanken die Änderungen der Eigenfrequenzen stärker als bei den Plattenmodellen. Auf eine Aufzählung ungültiger Modelle wird verzichtet, da dies im Detail uninteressant ist. Allerdings kann gesagt werden, dass für alle Auslegungsmoden gültige Modelle existieren, die zu gezielten ERP-Reduktionen oder zu gezielten ERP-Erhöhungen führen.

Die Ergebnisse bei der Platte und beim Gepäckraumboden zeigen zunächst, dass die ausschließliche Vorgabe von Orten für eine reine Massenerhöhung nicht ausreichend ist, um die ERP gezielt zu senken oder zu erhöhen. Zum einen muss die jeweilige Masse auf die Frequenz abgestimmt sein, da es ansonsten sogar zu einer umgekehrten Auswirkung auf die ERP kommen kann. Weiterhin kann über

eine auf die Frequenz abgestimmte Größe der Modifikationsfläche die erzielbare Reduktion oder Erhöhung der ERP-Pegel maximiert werden. Zusammenfassend kann allerdings festgehalten werden, dass basierend auf den Masse-ERP-Skalarfeldern sowohl bei der Platte als auch beim Gepäckraumboden für alle Auslegungsmoden mit mindestens einer Modifikation eine gezielte Reduktion der ERP-Pegel und eine gezielte Erhöhung der ERP-Pegel erreicht werden kann. Die Höhe der maximal erzielten Pegeländerungen sind aber stark von der Auslegungsmode abhängig. Die für die einzelnen Auslegungsmoden maximal erzielten Erhöhungen der ERP-Pegel (über alle Modifikationseinstellungen und Grenzwerte hinweg) reichen bei der Platte von 0,7 dB bis 16,5 dB ($\bar{\varnothing}$ 5,6 dB) und beim Gepäckraumboden von 2,2 dB bis 51,9 dB ($\bar{\varnothing}$ 20,8 dB). Die maximal erzielten Reduktionen der ERP-Pegel der einzelnen Auslegungsmoden betragen sogar 3,1 dB bis 52,5 dB ($\bar{\varnothing}$ 27,4 dB) bei der Platte und 0,6 dB bis 45,6 dB ($\bar{\varnothing}$ 19,9 dB) beim Gepäckraumboden. Werden diese Ergebnisse um alle Modelle bereinigt, bei denen sich mindestens eine der ersten 25 Eigenfrequenzen um mehr als 10 % verschiebt, verbleiben maximale Pegelerhöhungen und Pegelreduktionen von 0,7 dB bis 15,9 dB ($\bar{\varnothing}$ 5,2 dB) bzw. 1,4 dB bis 46 dB ($\bar{\varnothing}$ 23,6 dB) bei der Platte und 0,8 dB bis 34,2 dB ($\bar{\varnothing}$ 15,2 dB) bzw. 0,6 dB bis 31,1 dB ($\bar{\varnothing}$ 14,4 dB) beim Gepäckraumboden. Diese Ergebnisse sowie die erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP bei strengeren Anforderungen an die Lage der Eigenfrequenzen (max. $\pm 5\%$ und $\pm 2\%$) sind in Abbildung 5.20 zusammengefasst, wobei „beliebig“ den Fall kennzeichnet, dass alle modifizierten Modelle unabhängig von den Eigenfrequenzverschiebungen berücksichtigt werden.

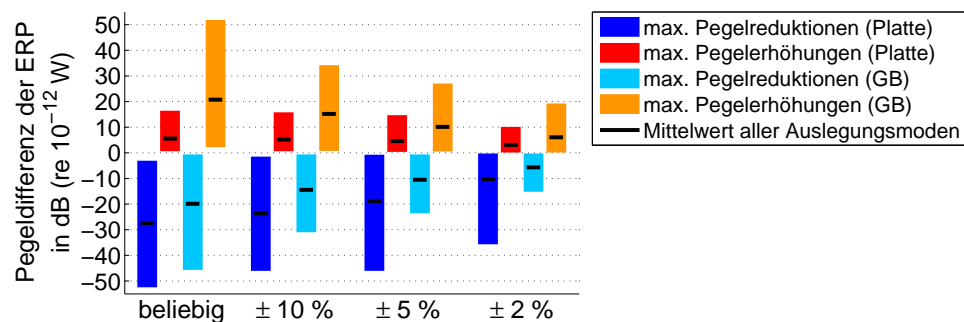


Abbildung 5.20: Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP für alle Auslegungsmoden bei der Platte und beim Gepäckraumboden für alle untersuchten Modifikationseinstellungen bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen bei Untersuchung des Masseneinflusses

Je strenger die Vorgaben an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen sind, desto geringer fallen die erzielten Änderungen der ERP-Pegel aus. Allerdings sind für die meisten Auslegungsmoden auch bei einer Vorgabe von nur $\pm 2\%$ die erzielbaren Pegelreduktionen aufgrund einer Massenerhöhung basierend auf Positionen vorgegeben durch die ERP-Skalarfelder in einer nennenswerten Größenordnung. Die kleinsten Pegelreduktionen betreffen bei der Platte die Auslegungsmoden 1 und 2 und beim Gepäckraumboden die Auslegungsmoden 1, 4 und 12.

5.3.2 Steifigkeitserhöhungen

Die Ergebnisse der untersuchten Steifigkeitserhöhungen sind in Abbildung 5.21 für die Plattenmodelle $ERP_{\max, X\%, 1...25}$ (oben) und $ERP_{\min, X\%, 1...25}$ (unten) gemeinsam für die beiden Modifikationseinstellungen Nr. 4 (links) und Nr. 5 (rechts) (Skindicke = Basismodelldicke bzw. Skindicke = Basismodelldicke/2 bei jeweils konstantem Elastizitätsmodul) dargestellt.

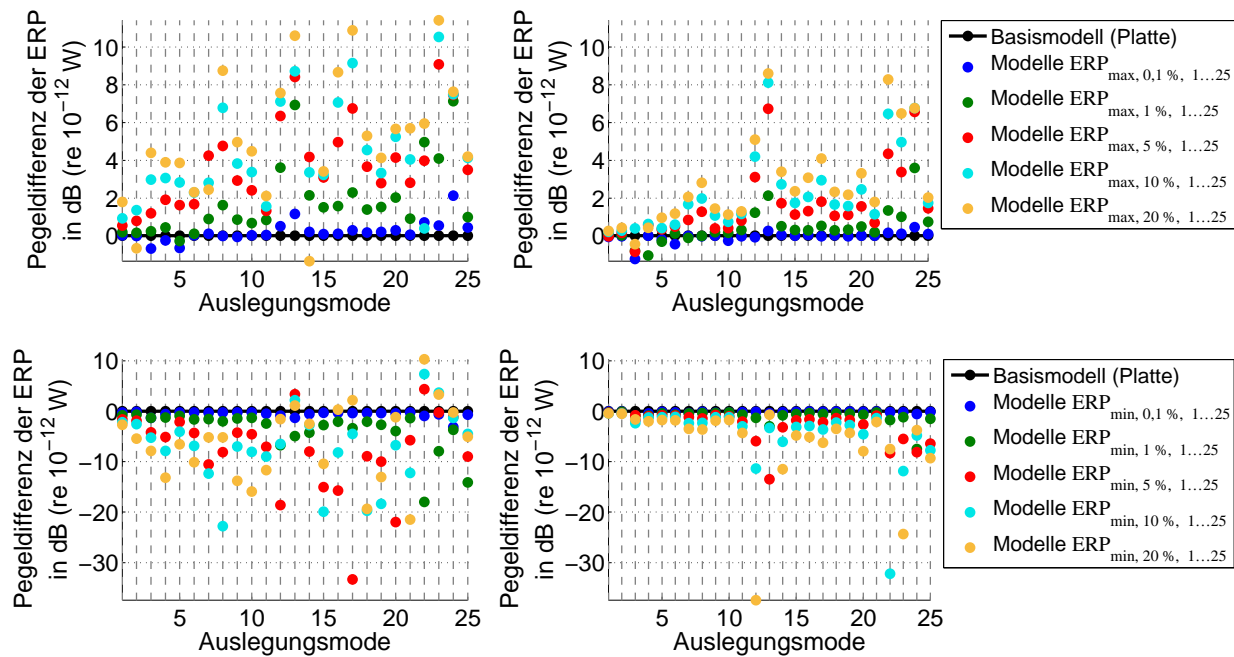


Abbildung 5.21: Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1...25}$ (oben) und $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ (unten) bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4 (links) und Nr. 5 (rechts) bei Untersuchung des Steifigkeitseinflusses

Ebenso wie bei den Untersuchungen des Masseneinflusses zeigt sich auch bei den Steifigkeitsuntersuchungen, dass die große Mehrheit der Modelle $ERP_{\max, X \% , 1...25}$ und $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ wie gewünscht zu einer Erhöhung der ERP-Pegel bzw. zu einer Reduktion der ERP-Pegel führen. Weiterhin sind, wie auch bei den Massenerhöhungen, die mehrheitlich erzielten Änderungen der ERP-Pegel der Modelle $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ größer als bei den Modellen $ERP_{\max, X \% , 1...25}$. Eine geringere Modifikationsdicke (Modifikationseinstellung Nr. 5) führt in den meisten Auslegungsmoden zu deutlich geringeren Pegeländerungen. In einigen Auslegungsmoden (13, 22 und 23), in denen bei der größeren Modifikationsdicke allerdings für die meisten Grenzwerte keine Reduktion der ERP-Pegel erzielt werden kann, werden mit der geringeren Dicke dagegen für einige Grenzwerte sogar nennenswerte Pegelreduktionen (> 3 dB) erreicht. In fast allen Auslegungsmoden und für beide Modellgruppen $ERP_{\max, X \% , 1...25}$ und $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ steigt die Pegeländerung mit zunehmendem Grenzwert an, was größeren Modifikationsflächen und damit einer größeren Steifigkeitserhöhung durch die Modifikation entspricht.

Die Ergebnisse der gleichen Untersuchungen am Gepäckraumboden zeigt Abbildung 5.22. Auch beim Gepäckraumboden erzielt die Mehrheit der Modelle eine Änderung der ERP-Pegel in die gewünschte Richtung, allerdings gibt es deutlich mehr Auslegungsmoden, in denen das nicht der Fall ist. Auch eine Halbierung der Modifikationsdicke führt – im Gegensatz zu einer Dickenhalbierung bei der Platte – gerade bei den Modellen $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ zu keiner deutlichen Verbesserung. In den drei Auslegungsmoden 9, 12 und 25 kann für keinen Grenzwert bei einer der beiden untersuchten Dicken eine Pegelreduktion erzielt werden. Da im Falle der Massenerhöhungen teilweise eine weitere Verringerung der Masse erfolgreich war, wird auch hier eine zusätzliche Untersuchung am Gepäckraumboden mit einer verringerten Steifigkeitserhöhung durchgeführt. Dabei wird die Dicke der Modifikation auf ein Zehntel der Basismodelldicke gesetzt (0,0705 mm); die Ergebnisse für die Modelle $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ sind in Abbildung 5.23 zu sehen.

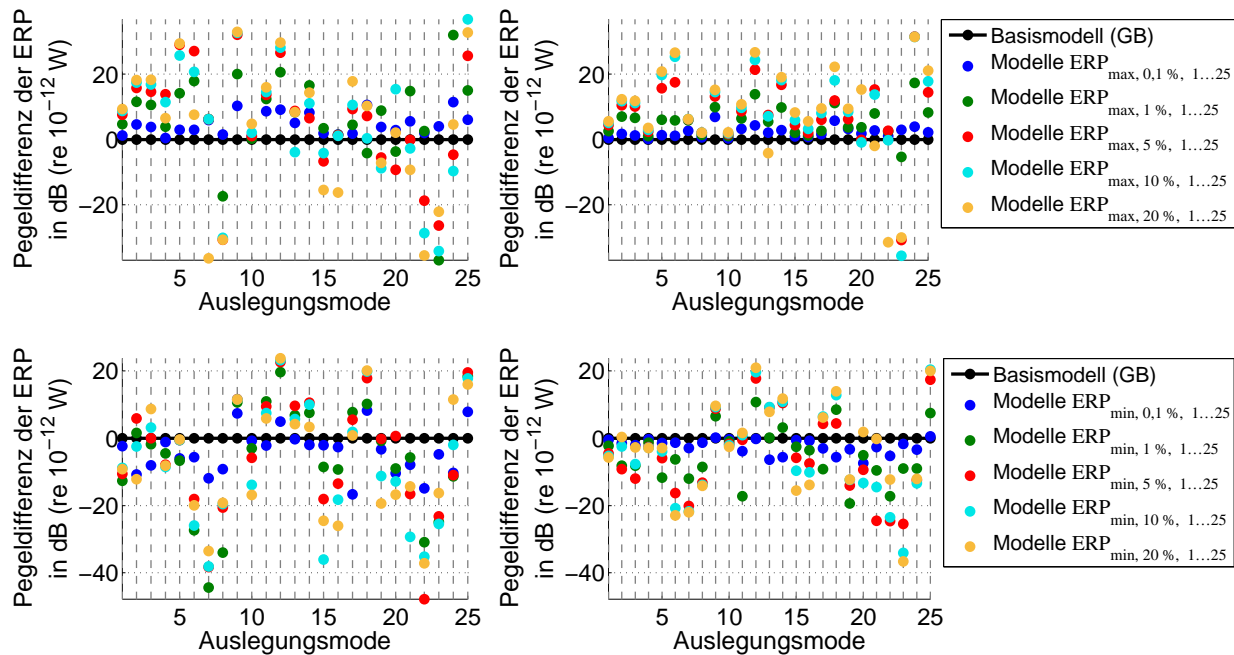


Abbildung 5.22: Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X \%, 1...25}$ (oben) und $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ (unten) bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4 (links) und Nr. 5 (rechts) bei Untersuchung des Steifigkeitseinflusses

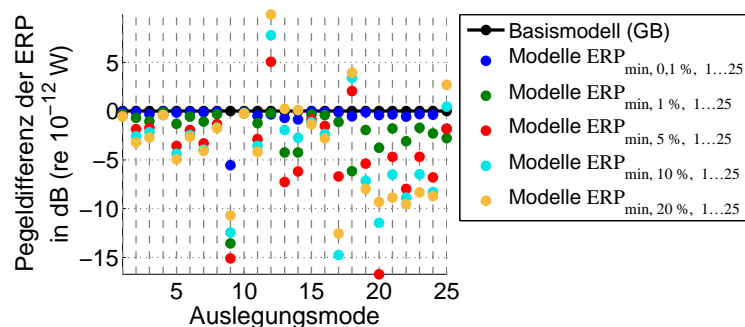


Abbildung 5.23: Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für eine Modifikationsdicke von 0,0705 mm bei Untersuchung des Steifigkeitseinflusses

Es zeigt sich, dass diese deutlich geringere Modifikationsdicke für zwei der drei problematischen Auslegungsmoden (9 und 25) zu Reduktionen der ERP-Pegel führt, die sogar nennenswert sind. Lediglich die Auslegungsmode 12 bleibt als Ausreißer bestehen, in welcher es lediglich zu einer kaum wahrnehmbaren Reduktion kommt. Eine Betrachtung der Eigenfrequenzen (nicht dargestellt) zeigt, dass sowohl bei der Platte als auch beim Gepäckraumboden die Steifigkeitserhöhungen mehrheitlich zu einem Anstieg der Eigenfrequenzen führen. Eine Zusammenfassung der maximal erzielten Reduktionen und Erhöhungen der ERP-Pegel pro Auslegungsmode (über alle Modifikationseinstellungen und Grenzwerte hinweg) ist in Abbildung 5.24 für verschiedene Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen der jeweiligen Modelle (beliebig, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ und $\pm 2\%$) zu sehen.

Wie auch bei den Untersuchungen des Masseneinflusses werden auch bei einer maximal erlaubten Verschiebung der Eigenfrequenzen von 2 % durchschnittlich über alle Auslegungsmoden hinweg nennenswerte ERP-Reduktionen (Mittelwerte > 3 dB) bei der Platte und beim Gepäckraumboden erzielt.

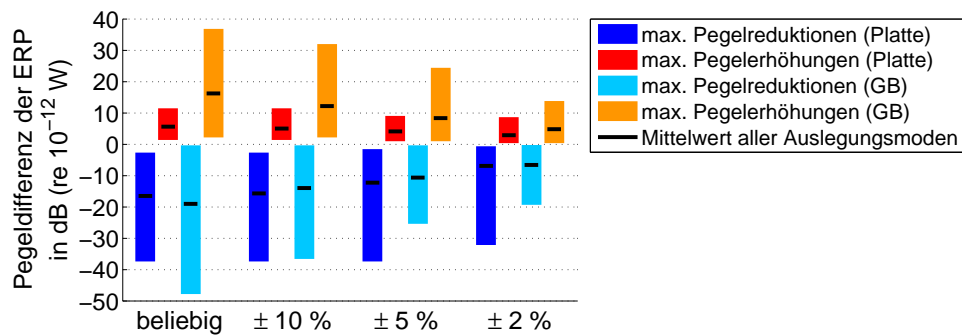


Abbildung 5.24: Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP für alle Auslegungsmoden bei der Platte und beim Gepäckraumboden für alle untersuchten Modifikationseinstellungen bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen bei Untersuchung des Steifigkeitseinflusses

5.3.3 Massen- und Steifigkeitserhöhungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse bei einer gleichzeitigen Erhöhung von Masse und Steifigkeit gezeigt. In Abbildung 5.25 sind die Ergebnisse der Plattenmodelle $ERP_{\max, X \%, 1...25}$ (oben) und $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ (unten) für die beiden Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) (Masse konstant bei 1 kg bzw. 0,1 kg) zu sehen.

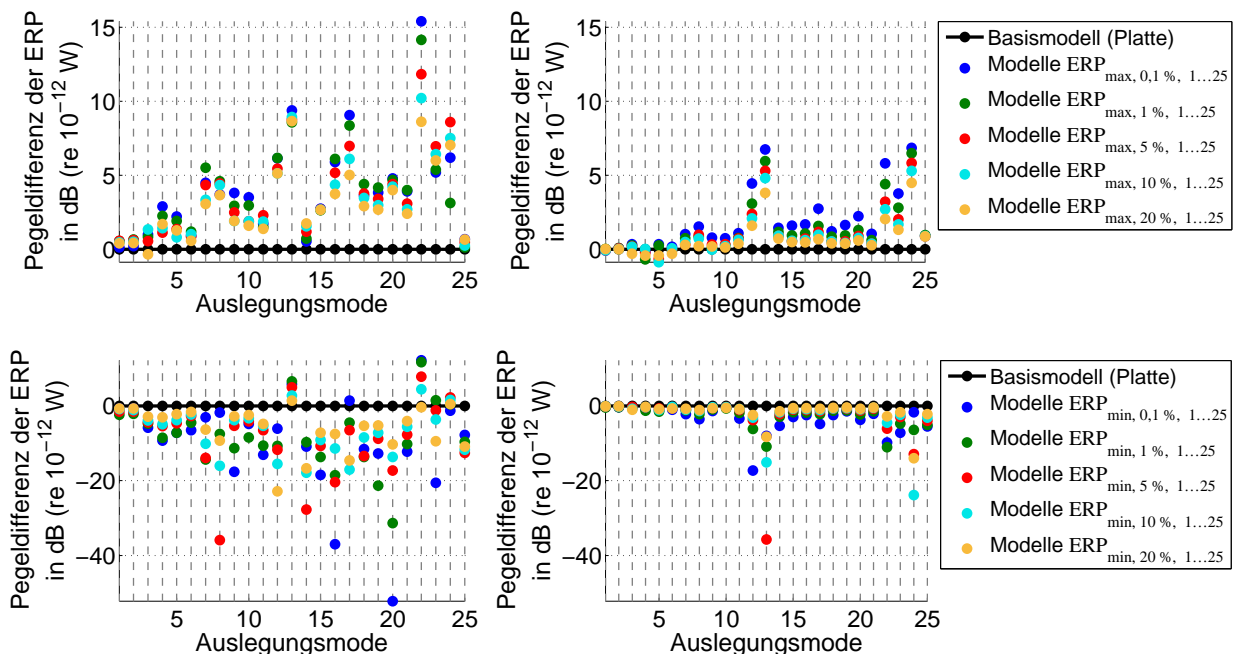


Abbildung 5.25: Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\max, X \%, 1...25}$ (oben) und $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ (unten) bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses

Die Pegeldifferenzen der ERP weisen eine große Ähnlichkeit zu den entsprechenden Pegeldifferenzen bei einer reinen Massenerhöhung (siehe Abbildung 5.12) auf. Im direkten Vergleich fallen die Pegeldifferenzen in den meisten Auslegungsmoden allerdings nun geringfügig kleiner aus. Auf der anderen Seite reduziert sich auch die Anzahl der unerwünschten Fälle, in denen es zu Erhöhungen der ERP-Pegel bei den Modellen $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ kommt. Weiterhin zeigt sich, dass in den meisten Auslegungsmoden nun ein anderer Grenzwert zur höchsten Pegelreduktion führt: Meist sind die kleineren Modifikationsflächen besser als größere. Für einen erneuten Vergleich zu den erzielten Pegeländerun-

gen basierend auf der STI in Abbildung 4.13 ist der vergrößerte Ausschnitt der Pegeldifferenzen der Modelle $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ bei einer Modifikationsmasse von 0,1 kg in Abbildung 5.26 gezeigt.

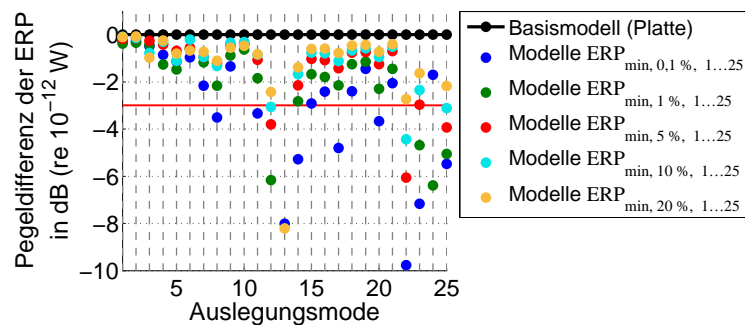


Abbildung 5.26: Ausschnitt der Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 3 bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses

Auch für die masse- und steifigkeitserhöhenden Modifikationen bestätigt sich, dass 0,1 kg leichte Modifikationen basierend auf den ERP-Skalarfeldern in den meisten Auslegungsmoden zu den gleichen oder höheren Reduktionen der ERP-Pegel führen wie 1 kg schwere Modifikationen basierend auf der STI.

Die Ergebnisse der Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1...25}$ und $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ sind oben bzw. unten für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) in Abbildung 5.27 dargestellt.

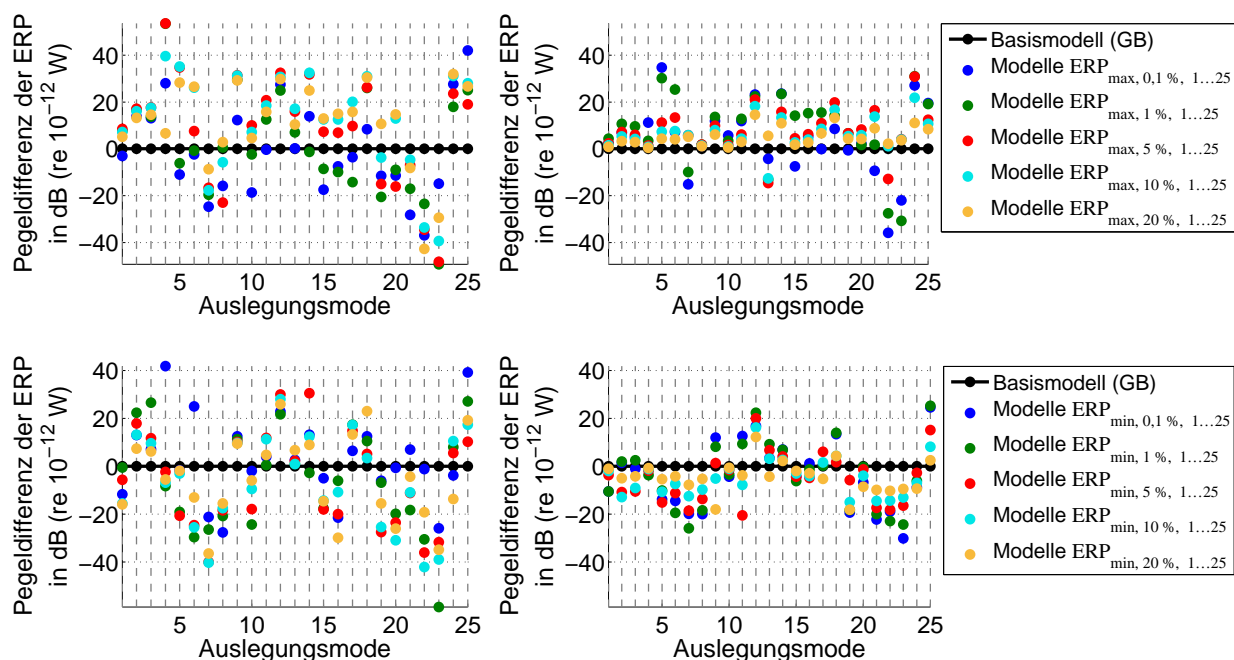


Abbildung 5.27: Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1...25}$ (oben) und $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ (unten) bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses

Wie auch schon bei der reinen Massenerhöhung führen viele Modelle nicht zu einer Pegeldifferenz der ERP in die gewünschte Richtung. Allerdings zeigt sich auch hier, dass beim Gepäckraumboden eine kleinere Masse in vielen Auslegungsmoden zu besseren Ergebnissen führt, da mehr Modelle $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ tatsächlich eine Pegelreduktion aufweisen. Wird die Modifikationsmasse weiter auf

0,01 kg verringert, siehe Abbildung 5.28, so werden auch in den Auslegungsmoden 12 und 25 die ERP-Pegel reduziert, was mit den höheren Massen nicht möglich war.

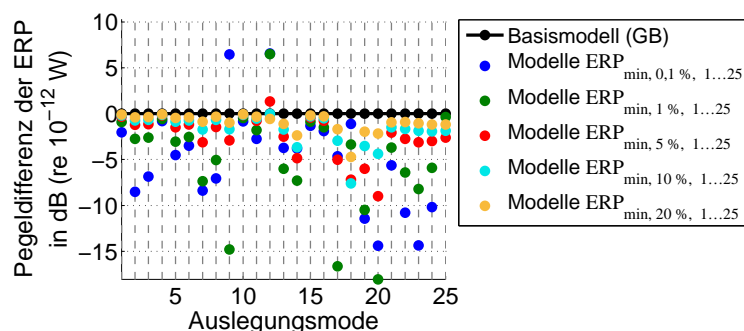


Abbildung 5.28: Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ bzgl. des Basismodells für eine Modifikationsmasse von 0,01 kg bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses

Weiterhin zeigt sich, dass im Gegensatz zur Platte in den meisten Auslegungsmoden mit einer gleichzeitigen Erhöhung von Masse und Steifigkeit größere Reduktionen der ERP-Pegel erzielt werden können als mit einer reinen Massenerhöhung. In den Ergebnissen der Modifikationseinstellungen Nr. 4 und Nr. 5 zeigen sich sowohl bei der Platte als auch beim Gepäckraumboden keine relevanten Unterschiede zu den Ergebnissen der reinen Massenerhöhungen, sodass auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet wird. Auch für die Untersuchungen des Masse- und Steifigkeitseinflusses werden über alle Modifikationseinstellungen hinweg die maximal erzielten Pegeldifferenzen der ERP pro Auslegungsmode zusammengefasst, siehe Abbildung 5.29. Diese Zusammenfassung wird ebenfalls für unterschiedliche Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen erstellt.

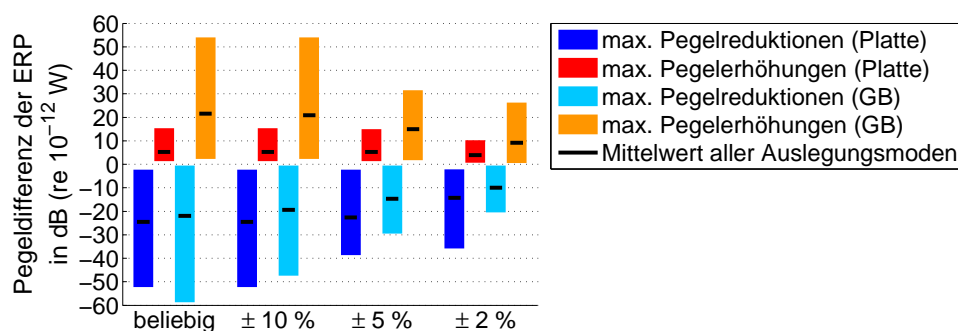


Abbildung 5.29: Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP für alle Auslegungsmoden bei der Platte und beim Gepäckraumboden für alle untersuchten Modifikationseinstellungen bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses

Die Reduktionen und Erhöhungen der ERP-Pegel bei Berücksichtigung aller Modelle (beliebig) sowie bei Berücksichtigung aller Modelle mit einer maximalen Verschiebung der Eigenfrequenzen um $\pm 10 \%$ unterscheiden sich weniger als es bei den reinen Massenerhöhungen der Fall war. Dies zeigt, dass die Verschiebungen der Eigenfrequenzen geringer ausfallen und damit weniger Modelle als ungünstig eingestuft werden. Abbildung 5.29 zeigt zudem, dass sich die Einflüsse bei einer gemeinsamen Erhöhung von Masse und Steifigkeit – was bei realen Strukturen meist nicht trennbar ist – nicht gegenseitig aufheben, sondern ebenfalls durchschnittlich sehr große Pegelreduktionen erzielt werden können. So werden durchschnittlich über alle Auslegungsmoden hinweg sowohl bei der Platte als

auch beim Gepäckraumboden für maximal erlaubte Eigenfrequenzänderungen von nur $\pm 5\%$ oder $\pm 2\%$ sogar größere Reduktionen der ERP-Pegel erreicht als mit den reinen Massenerhöhungen.

Eine abschließende, bisher offene Frage ist, ob sich anhand der in Abschnitt 5.2 vorgestellten Charakteristiken der ERP-Skalarfelder oder anderer Eigenschaften der Basismodelle vorhersagen lässt, ob die Modifikation für eine Auslegungsmode eher groß oder klein, eher schwer oder leicht gewählt werden sollte, um die ERP maximal zu senken. Bei den Charakteristiken der ERP-Skalarfelder handelt es sich um die Dominanz des Massen- oder Steifigkeitseinflusses auf die Skalarfelder des Modifikationsfalls 3, die Flächenanteile der ERP-Skalarfelder mit einer negativen Pegeldifferenz der ERP sowie das Verhältnis zwischen minimaler und maximaler Pegeldifferenzen der ERP-Skalarfelder. In einem Vergleich der drei Abbildungen 5.8–5.10, in denen diese Charakteristiken zu sehen sind, mit den erzielten Reduktionen der ERP-Pegel oder eben auch nicht erzielten Pegelreduktionen der einzelnen Auslegungsmoden für die verschiedenen Modifikationseinstellungen können entgegen der Erwartung keinerlei Zusammenhänge erkannt werden. Weist beispielhaft der größere Teil eines ERP-Skalarfeldes negative Pegeldifferenzen der ERP auf, so bedeutet das nicht, dass bei gleichen Modifikationseinstellungen auch eine größere Reduktion als eine Erhöhung der ERP-Pegel erzielt werden kann. Ebenso wird bei gleichen Modifikationseinstellungen auch nicht in allen Auslegungsmoden eine größere Reduktion der ERP-Pegel erzielt, wenn im zugehörigen ERP-Skalarfeld die minimale Pegeldifferenz der ERP größer ist als die maximale Pegeldifferenz. Dagegen können bei beiden Basismodellen Tendenzen für die Wahl der Modifikationsmasse aus den Verläufen der Verhältnisse von maximalem Real- und Imaginärteil der Schwinggeschwindigkeit (Abbildungen 3.8 und 3.13) abgelesen werden. Beide Verläufe sind in Abbildung 5.30 links für die Platte und rechts für den Gepäckraumboden erneut dargestellt, wobei die Punkte aller Anregungsmoden anhand der Modifikationsergebnisse der entsprechenden Auslegungsmoden farbig markiert sind.

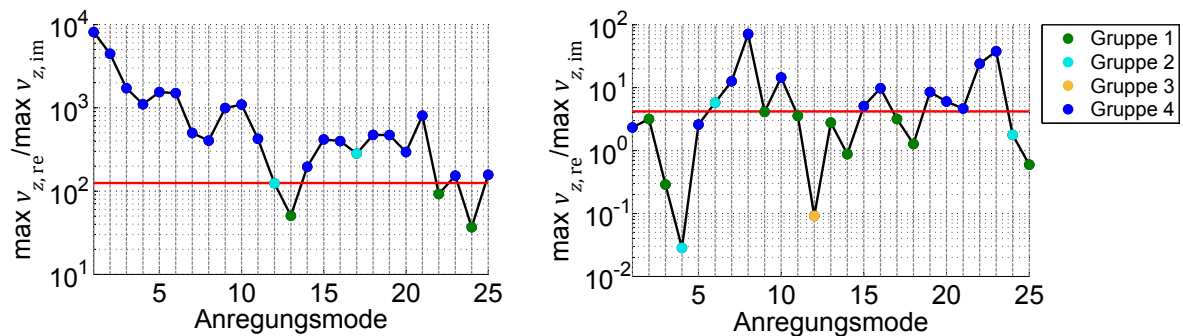


Abbildung 5.30: Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit \underline{v}_z über der Anregungsmode n für die Platte (links) und den Gepäckraumboden (rechts)

Alle Punkte der Gruppe 1 (grün) markieren Anregungsmoden, in denen mit einer kleineren Masse von 0,1 kg oder 0,01 kg größere Reduktionen der ERP-Pegel erzielt werden als mit einer Masse von 1 kg. Alle Punkte der Gruppe 2 (hellblau) markieren Anregungsmoden, in denen beim kleinsten Grenzwert von $X = 0,1\%$ mit einer kleineren Masse größere Pegelreduktionen verursacht werden. Der Punkt der Gruppe 3 (gelb) beinhaltet Anregungsmoden, in denen mit keiner untersuchten Modifikationseinstellung eine nennenswerte Pegelreduktion erwirkt wird. Hierunter fällt lediglich die Anregungsmode 12 beim Gepäckraumboden. Gruppe 4 (blau) beinhaltet alle verbleibenden Anregungsmoden. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass höhere Massen auch höhere Pegelreduktionen bewirken. Die rote

Linie ist rein als visuelle Stütze eingezeichnet, um die Punkte der einzelnen Anregungsmoden in zwei, für die Auswertung hilfreiche, Bereiche zu unterteilen – die Linie besitzt ansonsten keinerlei physikalische Bedeutung. Es fällt auf, dass alle Punkte der Gruppe 1 unterhalb dieser Linie liegen. Weiterhin liegt die große Mehrheit der Punkte, die in Gruppe 4 vertreten ist (dunkelblau), oberhalb der roten Linie. Daher kann geschlussfolgert werden, dass das Verhältnis von maximalem Real- und Imaginärteil der Schwinggeschwindigkeit als Indikator für die Massenauswahl herangezogen werden kann. Eine exakte Vorgabe für Masse oder Fläche der Modifikation kann daraus aber nicht abgeleitet werden, sodass in der Anwendung eine kleine Parametervariation notwendig bleibt. Damit bleibt die Simulationsanzahl aber dennoch weit unter der einer Optimierungsrechnung.

5.4 Vergleich der Ergebnisse mit Modifikationsergebnissen auf Basis von Expertenwissen

Die Erhöhung der Eingangsimpedanz stellt eine allgemeine Regel des lärmarmen Konstruierens dar [1, S. 315] und ist damit als Expertenwissen einzustufen. Dies kann in der Regel durch eine Erhöhung der Masse und/oder Steifigkeit direkt am Anregungsort erreicht werden [4, S. 244]. Ein weiterer Ansatz ist es, die Masse in Bereichen hoher Schwingungen zu platzieren. CONSTANS ET AL. [15] bspw. zeigen, dass die Schwingungen einer Platte stark reduziert werden können, wenn Massen an Punkten hoher Schwinggeschwindigkeiten appliziert werden. Die Modifikationen der untersuchten Modelle $ERP_{\min, X\%, 1...25}$ basierend auf den ERP-Skalarfeldern befinden sich für alle Auslegungsmoden weder immer über der Kraftanregung noch immer im Bereich der maximalen Schwinggeschwindigkeitsamplituden. Beides trifft in einigen Auslegungsmoden zu, aber in vielen nicht. Aus diesem Grund ist ein Vergleich der erzielbaren Reduktionen der ERP-Pegel aufgrund von Modifikationen basierend auf den ERP-Skalarfeldern mit erzielbaren Pegelreduktionen durch Modifikationen an der Kraftanregung sowie basierend auf der Schwinggeschwindigkeit wichtig, um die Relevanz und das Potenzial der in dieser Arbeit vorgestellten Methode zur Lokalisierung von Modifikationspositionen aufzuzeigen.

Zunächst wird zur Erhöhung der Eingangsimpedanz zentriert über dem Kraftangriffspunkt eine quadratische Modifikation positioniert. Dieses Modell wird im Folgenden Modell Z_{ein} genannt. Dabei werden sowohl zwei verschiedene Modifikationsgrößen (4 und 16 Skinelemente) als auch zwei verschiedene Modifikationsmassen (1 kg und 0,1 kg) untersucht. Dichte und Elastizitätsmodul werden entsprechend der Massenvorgabe angepasst, wobei der Elastizitätsmodul wie in allen vorangegangenen Untersuchungen um den gleichen Faktor wie die Dichte korrigiert wird. Die Skindicke entspricht der Dicke des Basismodells. Parallel dazu werden entsprechende Modelle $ERP_{\min, 1...25}$ mit gleich großen – aber möglicherweise anders geformten – und gleich schweren Modifikationen anhand der ERP-Skalarfelder des Modifikationsfalls 3 (Massen- und Steifigkeitseinfluss) erstellt. Dabei wird die gleiche Vorgehensweise zur Auswahl der Skinelemente, wie in Abbildung 5.11 gezeigt, angewandt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 5.31 zu sehen – links für eine Modifikationsmasse von 1 kg und rechts für eine Modifikationsmasse von 0,1 kg.

In den meisten Auslegungsmoden liegen für beide Modifikationsmassen und beide Modifikationsgrößen die Punkte der Modelle $ERP_{\min, 1...25}$ deutlich unter denen der Modelle Z_{ein} . Basierend auf den ERP-Skalarfeldern können somit deutlich höhere Reduktionen der ERP-Pegel erzielt werden. Bei einer Modifikationsmasse von 1 kg führen beide Ansätze in der Auslegungsmode 13 nicht zur gewünschten Pegelreduktion. Im Falle der Modelle $ERP_{\min, 1...25}$ ändert sich dies für die kleinere Modifikationsmasse

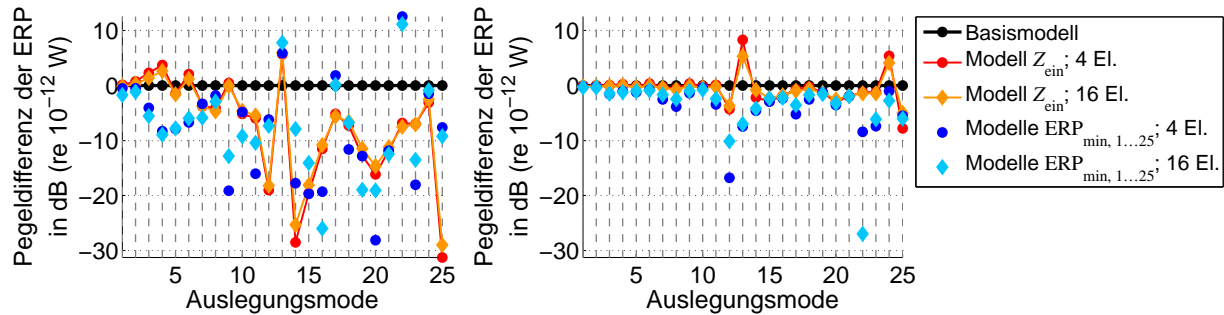


Abbildung 5.31: Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle Z_{ein} und $\text{ERP}_{\text{min}, 1 \dots 25}$ bzgl. des Basismodells für eine Modifikationsmasse von 1 kg (links) und von 0,1 kg (rechts)

von 0,1 kg. Bei den Modellen Z_{ein} ist dagegen auch mit der kleineren Masse keine Pegelreduktion erzielbar. Die Ergebnisse der Modelle Z_{ein} , die mit einer Modifikationsmasse von 1 kg erzielt werden, können insgesamt über alle Auslegungsmode betrachtet als gut angesehen werden – gerade unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es sich jeweils um das gleiche Modell für alle Anregungsmode handelt. Ist es allerdings wie in der vorliegenden Arbeit das Ziel, für eine einzelne Frequenz eine Reduktion der Schallabstrahlung zu erreichen, so können anhand der ERP-Skalarfelder für fast alle Auslegungsmode bessere Modifikationsorte gefunden werden. Diese Ergebnisse decken sich mit Untersuchungen von RATLE und BERRY [24], die über einen genetischen Algorithmus mit dem Ziel einer Reduktion der mittleren quadratischen Schwinggeschwindigkeit in einem definierten Frequenzband fünf Massen auf einer Platte platzieren. Ihre Vermutung, dass durch den Algorithmus alle Massen am Anregungsort positioniert werden, bestätigt sich nicht, sondern andere Positionen stellen sich als noch besser für die Reduktion der Schwinggeschwindigkeiten im gewählten Frequenzbereich heraus.

Im nächsten Schritt wird die Platte anhand der Schwinggeschwindigkeit modifiziert. Da die Schwinggeschwindigkeit \underline{v} ein komplexes Vektorfeld ist, muss sie zunächst auf ein Skalarfeld reduziert werden, welches analog zu den ERP-Skalarfeldern als „Landkarte“ genutzt werden kann. Gleichung (2.11) zur Bestimmung der Schallleistung zeigt, dass dort der quadratische Normalanteil der Schwinggeschwindigkeit $\underline{v}_n \underline{v}_n^* = v_n^2$ eingeht. Der Term v_n entspricht dabei dem Betrag (der Amplitude) der komplexen Schwinggeschwindigkeit in Normalenrichtung $v_{n,\text{mag}}$, weswegen dieser Betrag als Skalarfeld ($V_{n,\text{mag}}$) zur Platzierung der Modifikationen verwendet wird. Analog zur Vorgehensweise der ERP-Skalarfeld-basierten Modifikationen werden anhand der Maxima im Skalarfeld $V_{n,\text{mag}}(f)$ die Modifikationselemente bestimmt. Basierend auf der Schwinggeschwindigkeit wird ebenfalls für jede Frequenz ein eigenes Modell erstellt. Die resultierenden Modelle werden im Folgenden $V_{n,\text{mag}, \text{max}, 1 \dots 25}$ genannt. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen der Modelle basierend auf der Schwinggeschwindigkeit mit den Modellen basierend auf den ERP-Skalarfeldern ist in Abbildung 5.32 zu sehen. Hier sind ebenfalls links die Ergebnisse für eine Modifikationsmasse von 1 kg und rechts für 0,1 kg dargestellt.

Auch in diesem Vergleich können die anhand der ERP-Skalarfelder modifizierten Modelle überzeugen. Mit Ausnahme der Auslegungsmode 13, 24 und 25 schneiden sie in allen Auslegungsmode deutlich besser ab. Dieser Vergleich zeigt einmal mehr, dass es nicht ausreicht, die Masse und die Steifigkeit einer Struktur zu erhöhen, um die Eingangsimpedanz und damit die Schallleistung zu senken, sondern dies muss auch an der richtigen Position geschehen. Die Vergleiche der erzielten Reduktionen der ERP-Pegel zwischen Modifikationen, die anhand der ERP-Skalarfelder und anhand von Expertenwis-

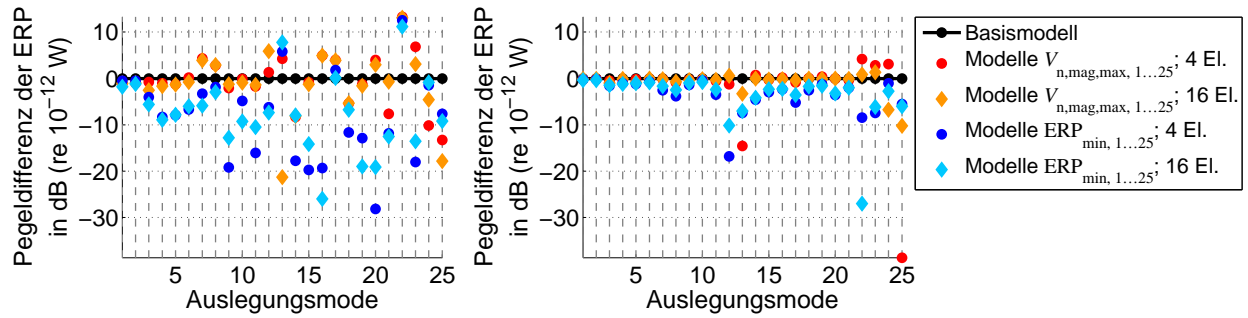


Abbildung 5.32: Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $V_{n,mag,max,1...25}$ und $ERP_{min,1...25}$ bzgl. des Basismodells für eine Modifikationsmasse von 1 kg (links) und von 0,1 kg (rechts)

sen platziert wurden, zeigen, dass die ERP-Skalarfelder in den meisten Fällen der bessere Indikator für solche Positionen sind. Eine Erhöhung von Masse und Steifigkeit am Anregungsort hat in den meisten Anregungsmoden zwar, wie erwartet, zu einer Erhöhung der Eingangsimpedanz geführt, da die ERP gesenkt werden konnte, allerdings konnte gezeigt werden, dass es in Abhängigkeit von der Frequenz andere Positionen gibt, die geeigneter sind.

5.5 Ableitung von Modifikationsregeln durch Approximation der unterschiedlichen ERP-Skalarfelder anhand der Strukturgrößen der Basismodelle

Ziel dieses Abschnitts ist es, Zusammenhänge zwischen den ERP-Skalarfeldern und den Strukturgrößen des jeweiligen Basismodells zu identifizieren, um die ERP-Skalarfelder anhand dieser Größen approximieren und damit vorhersagen zu können. Eine solche Approximationslösung würde es ermöglichen, dass für jede Struktur direkt die geeignete Position für masse- und/oder steifigkeitserhöhende Modifikationen berechnet werden kann und der Aufwand der ERP-Skalarfeld-Erstellung entfällt. Für eine solche Aufgabe eignen sich Regressionsanalysen, da sie untersuchen, ob eine Zielgröße (Regressand) durch eine oder mehrere andere Größen (Regressoren) erklärt werden kann [74, S.86]. Im ursprünglichen Sinne untersuchen Regressionsanalysen den Einfluss der Regressoren auf den Regressanden. In dieser Arbeit wird die Regressionsanalyse als Möglichkeit genutzt, eine mathematische Approximation des Regressanden durch die vorgegebenen Regressoren zu erstellen, wobei eine Approximation basierend auf der multiplen linearen Regression durchgeführt wird.

Die multiple lineare Regression unterstellt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Regressanden \vec{Y} und den Regressoren \vec{X}_m [74, S.91] und ist damit die Erweiterung der linearen Regression, welche nur einen Regressor berücksichtigt. Die Regressionsfunktion lautet

$$\vec{Y} = \alpha + \beta_1 \vec{X}_1 + \beta_2 \vec{X}_2 + \dots + \beta_q \vec{X}_q + \vec{\epsilon} = \mathbf{X} \vec{\beta} + \vec{\epsilon}, \quad (5.1)$$

wobei α und β_q den Regressionskoeffizienten entsprechen und $\vec{\epsilon}$ den Fehlerterm oder Rest bezeichnet [74, S.92]. Zusammengefasst in Matrixschreibweise enthält $\vec{\beta}$ alle Regressionskoeffizienten α und β_q und \mathbf{X} alle Regressoren \vec{X}_q inklusive des zu α gehörigen Konstantanteils (Vektor besetzt mit Einsen). Sowohl Regressand als auch Regressoren sind Vektoren und enthalten mehrere, aber jeweils gleich viele Werte. Die Bestimmung der unbekannten Regressionskoeffizienten erfolgt über die Methode der kleinsten Quadrate, bei der die Regressionskoeffizienten so geschätzt werden, dass die quadrierten Abweichungen zwischen Regressand und den jeweiligen Regressoren minimal werden

[74, S. 92]. Eine detaillierte Beschreibung der multiplen linearen Regression sowie der Schätzung der Regressionskoeffizienten ist in vielen Lehrbüchern, wie bspw. von MITTAG [75, S. 260 ff.], zu finden.

5.5.1 Auswahl des Regressanden und der Regressoren

In dieser Arbeit entspricht der Regressand einem ERP-Skalarfeld – für jede Anregungsmode, jedes Basismodell und jeden der drei Modifikationsfälle wird daher zunächst eine eigene Regressionslösung ermittelt. Für den Regressanden werden die Pegeldifferenzen der ERP bzgl. des Basismodells von jedem Skalarfeld in einen Vektor umgeschrieben, sodass die Vektorlänge der Anzahl der FE-Elemente des jeweiligen Basismodells – 5394 und 15288 bei Platte bzw. Gepäckraumboden – entspricht.

Die Regressoren sollen auf den Strukturgrößen des Basismodells basieren. Die Auswahl, welche Strukturgrößen berücksichtigt werden, kann frei getroffen werden. In dieser Arbeit werden – basierend auf dem Vorbild der STI-Gleichung (2.7) – alle sechs Schnittkräfte und alle drei Schnittmomente ($\underline{\mathbf{SG}}_i$ mit $i = 1, \dots, 9$) sowie alle drei rotatorischen und alle drei translatorischen Schwinggeschwindigkeiten ($\underline{\mathbf{VG}}_j$ mit $j = 1, \dots, 6$) verwendet. Weitere mögliche Größen wären die Spannungen, allerdings stecken diese Informationen in den Schnittgrößen, da diese mittels Integration über die Strukturdicke aus den Spannungen bestimmt werden [62, Kap. 29.6.7]. Auch die Strukturgrößen werden in der gleichen Reihenfolge wie die ERP-Skalarfelder in Vektoren umgeformt ($\underline{\mathbf{SG}}_i \rightarrow \vec{\mathbf{SG}}_i$ und $\underline{\mathbf{VG}}_j \rightarrow \vec{\mathbf{VG}}_j$) – vorher werden sie im Falle der Schwinggeschwindigkeiten von den Knotenpositionen auf die Elementmittelpunkte gemittelt und in die lokalen Elementkoordinatensysteme transformiert. Da es sich bei allen ausgewählten Strukturgrößen um komplexe Größen handelt, entstehen zudem pro Strukturgröße zwei Vektoren – je einer pro Real- und Imaginärteil ($\vec{\mathbf{SG}}_i \rightarrow \vec{\mathbf{SG}}_{i,\text{re}}, \vec{\mathbf{SG}}_{i,\text{im}}$ und $\vec{\mathbf{VG}}_j \rightarrow \vec{\mathbf{VG}}_{j,\text{re}}, \vec{\mathbf{VG}}_{j,\text{im}}$).

Weiterhin können die Regressoren beliebig definiert werden – so kann jeder Strukturgrößenvektor (z. B. $\vec{\mathbf{SG}}_{1,\text{re}}$), das Quadrat jedes Strukturgrößenvektors (z. B. $\vec{\mathbf{SG}}_{1,\text{re}}^2$), der Sinus jedes Strukturgrößenvektors (z. B. $\sin(\vec{\mathbf{SG}}_{1,\text{re}})$), das Produkt aus zwei Strukturgrößenvektoren (z. B. $\vec{\mathbf{SG}}_{1,\text{re}} \cdot \vec{\mathbf{SG}}_{1,\text{im}}$) etc. einen Regressor bilden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich der Begriff „linear“ in „multiple lineare Regression“ auf die Linearität der Regressionskoeffizienten und nicht der Regressoren bezieht [76, S. 139]. In Voruntersuchungen wurden verschiedene Varianten getestet – u. a. wurde jeder Strukturgrößenvektor sowie das Produkt aus je zwei Strukturgrößenvektoren als Regressor verwendet, wobei sich die Produktbildung als zielführender erwiesen hat und daher vorgestellt wird.

Auch bei der Produktbildung wurden in Voruntersuchungen verschiedene Varianten analysiert. Eine untersuchte Variante erlaubt alle möglichen Produkte zwischen den Strukturgrößenvektoren untereinander und mit sich selbst. Eine weitere Variante erlaubt dagegen nur Produkte zwischen einem Schnittgrößenvektor und einem Schwinggeschwindigkeitsvektor. Beide Varianten machen keine Einschränkung bzgl. des komplexen Anteils der Strukturgrößen, sodass Produkte aus zwei Realteilen, zwei Imaginärteilen sowie aus Real- und Imaginärteil als Regressoren verwendet werden. Da die erste Variante alle Regressoren der zweiten Variante als Teilmenge beinhaltet und auch zu besseren Ergebnissen führt, wird sie in dieser Arbeit vorgestellt. Über die vollständige multiplikative Kombination aller 30 Strukturgrößenvektoren – sechs Schnittkräfte, drei Schnittmomente, drei translatorische und drei rotatorische Schwinggeschwindigkeiten, die jeweils als Real- und Imaginärteil vorliegen – entstehen insgesamt 465 Regressoren. Je mehr Regressoren aufgenommen werden, desto eher fällt der Fehlerterm $\vec{\epsilon}$ in Gleichung (5.1) klein aus. Regressoren, die keinen Betrag zur Regressionslösung

beitragen, haben dagegen keinen Nachteil, da sie durch den Regressionsalgorithmus als überflüssig identifiziert werden und einen Regressionskoeffizienten von Null erhalten [77, S. 193].

5.5.2 Vorgehensweise zur Approximation der ERP-Skalarfelder

In dieser Arbeit handelt es sich aus zwei Gründen nicht um eine multiple lineare Regression im eigentlichen Sinne, sondern um eine Approximation basierend auf der multiplen linearen Regression. Der erste Grund betrifft die Tatsache, dass nicht alle Annahmen, die für eine multiple lineare Regression gelten [75, S. 262 f.], erfüllt sind. Eine Annahme lautet, dass zwischen den Regressoren keine linearen Abhängigkeiten bestehen. Eine Berechnung der Korrelationen zwischen allen Strukturgrößenvektoren nach Gleichung (3.7) zeigt allerdings, dass gerade beim Plattenmodell zwischen einigen Regressoren hohe Korrelationen bestehen und somit Multikollinearität vorliegt. Multikollinearität kann zu Über- oder Unterschätzungen des Regressanden sowie zu hohen Standardfehlern führen [78, S. 221 ff.]. Ob und in welcher Höhe diese Fehler auftreten, ist vorher schwer abzuschätzen – u. a. da vorher nicht klar ist, ob die betreffenden Regressoren wichtig sind oder nicht. Bevor daher Maßnahmen ergriffen werden, um den möglichen Problemen der Multikollinearität entgegenzuwirken, wird sie zunächst ignoriert und die durch die Regression erhaltenen Regressionslösungen werden analysiert und bewertet. Basierend auf den Ergebnissen wird entschieden, ob die Multikollinearität doch berücksichtigt werden muss. Als zweiter Grund ist anzumerken, dass die Regression in mehreren Iterationen durchgeführt wird, um so eine Regressionslösung zu finden, die eine minimale Anzahl an Regressoren aufweist, die gleichzeitig noch eine zu definierende Zielkorrelation zum Regressanden aufweist.

Die genaue Vorgehensweise zum Auffinden von Regressionslösungen eines ERP-Skalarfeldes ist in Abbildung 5.33 gezeigt. Die gezeigte iterative Vorgehensweise wird bei beiden Basismodellen für jede Anregungsmoden und für alle drei Modifikationsfälle, d. h. für jedes einzelne ERP-Skalarfeld, separat durchlaufen, sodass zunächst jeweils eine eigene Regressionslösung entsteht.

Nach der Definition aller nötigen Größen (Schritt (1) in Abbildung 5.33) wird in Schritt (2) die Regressionsmatrix aufgebaut. Dabei wird u. a. jede Spalte standardisiert, sodass sie jeweils einen Mittelwert von Null und eine Standardabweichung von Eins aufweist. Dieser Schritt ist notwendig, um den Beitrag der einzelnen Regressoren zur Regressionslösung anhand der Werte der Regressionskoeffizienten bewerten zu können. Weiterhin werden die Regressoren aufgrund der Standardisierung dimensionslos (keine Einheit). In Schritt (3) wird das Gleichungssystem gelöst und die Regressionskoeffizienten werden mittels der Matlab-Funktion *regress* berechnet. Diese Funktion benötigt im Allgemeinen die Erweiterung der Regressionsmatrix um einen Konstantanteil (Vektor besetzt mit Einsen), siehe Gleichung (5.1). Aufgrund der Standardisierung aller Spalten der Regressionsmatrix kann er allerdings weggelassen werden. Anschließend werden in Schritt (4) alle Regressoren anhand des Betrages ihrer Regressionskoeffizienten absteigend sortiert. Aufgrund der Standardisierung in Schritt (2) bedeutet ein höherer Betrag eines Regressionskoeffizienten, dass der zugehörige Regressor auch eine höhere lineare Korrelation zum Regressanden aufweist und damit einen höheren Beitrag zur Regressionslösung leistet als ein Regressor mit einem niedrigeren Betrag des Regressionskoeffizienten. Beginnend mit dem Regressor, der den höchsten Betrag des Regressionskoeffizienten aufweist, wird die Regressionslösung anschließend in Schritt (5) iterativ soweit aufgebaut, bis in der Abfrage (A1) eine vorgegebene Güte der Regressionslösung (Zielkorrelation) erreicht wird.

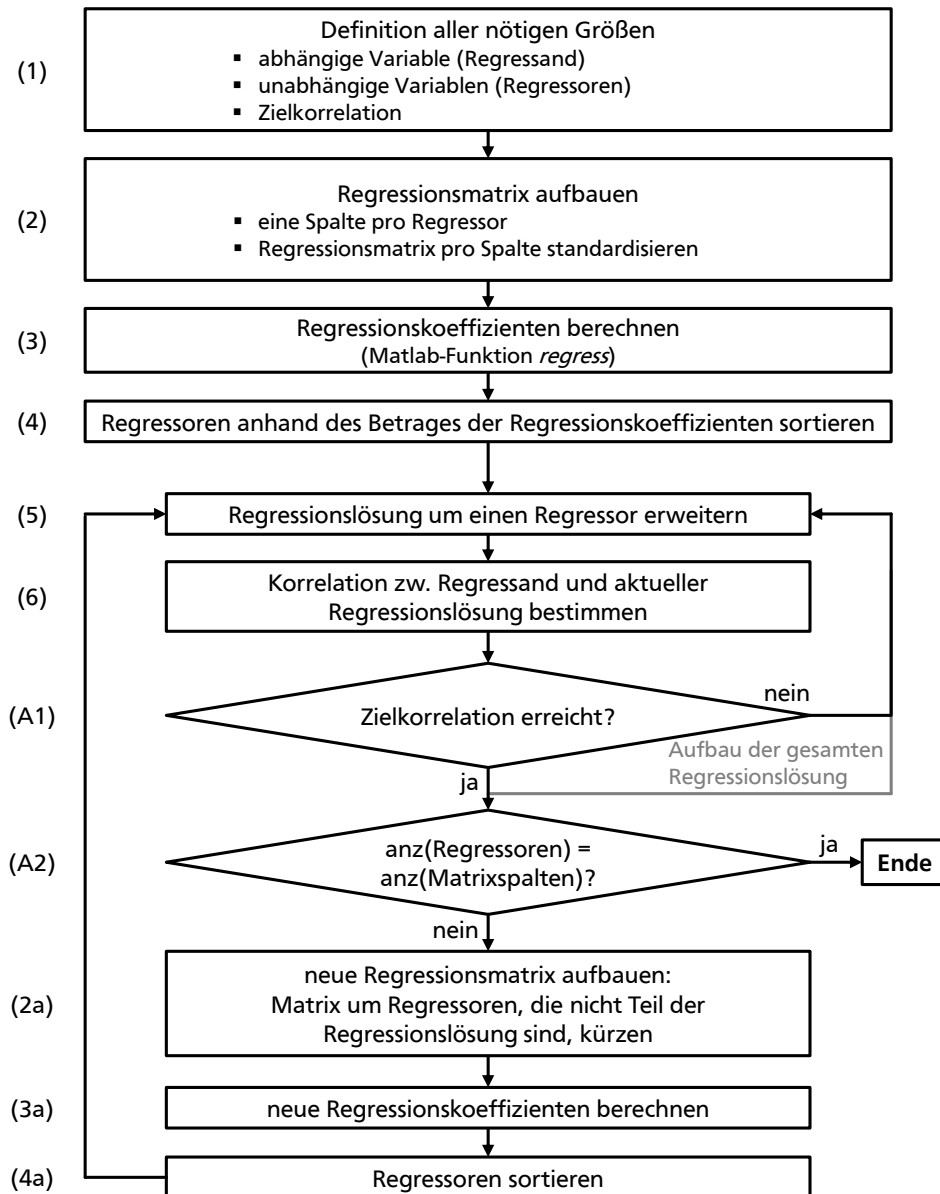


Abbildung 5.33: iterative Vorgehensweise zum Auffinden von Regressionslösungen der ERP-Skalarfelder basierend auf einer multiplen linearen Regression

In dieser Arbeit wird eine Zielkorrelation von 0,9 zwischen der Regressionslösung und dem Regressanden verwendet. Um die Information über die maximal mögliche Korrelation zwischen Regressand und allen Regressoren zu erhalten, wird allerdings auch die vollständige Regressionslösung aufgebaut. Wie bereits genannt, ist es das Ziel des iterativen Vorgehens, eine Regressionslösung zu finden, die möglichst wenige Regressoren aufweist (reduzierte Regressionslösung). Aus diesem Grund wird mit allen Regressoren, die Teil derjenigen Regressionslösung sind, mit welcher zuerst die Zielkorrelation erreicht wird, in den Schritten (2a)–(4a) erneut eine Regression durchgeführt. Anschließend wird in Schritt (5) die Regressionslösung erneut iterativ aufgebaut, bis in Abfrage (A1) die Zielkorrelation wieder erreicht wird. Im Anschluss daran wird in einer weiteren Abfrage (A2) überprüft, ob die Anzahl der dabei verwendeten Regressoren mit der Spaltenanzahl der Regressionsmatrix übereinstimmt. Ist dies der Fall, so bedeutet es, dass alle verbliebenen Regressoren in der Regressionslösung verwendet werden und keine weiteren Regressoren gestrichen werden können, um die vorgegebene Zielkorre-

lation zu erreichen. Dann entspricht die letzte zusammengesetzte Regressionslösung der weiter zu verwendenden reduzierten Regressionslösung des aktuellen ERP-Skalarfeldes und die Berechnung wird beendet. Anschließend startet der gesamte Durchlauf von vorne für ein weiteres ERP-Skalarfeld (andere Anregungsmode, anderes Basismodell oder anderer Modifikationsfall).

Die beschriebene Vorgehensweise aus Abbildung 5.33 liefert, wie bereits genannt, für jeden der drei Modifikationsfälle (Massen-, Steifigkeits- sowie Massen- und Steifigkeitseinfluss) mehrere Regressionslösungen – je eine pro Anregungsmode und pro Basismodell. Daher folgen auf diesen ersten Schritt zur Approximation der ERP-Skalarfelder drei weitere Schritte, um für jeden der drei Modifikationsfälle die einzelnen Regressionslösungen auf eine verbleibende Approximationslösung zu reduzieren. Diese gesuchte, finale Lösung pro Modifikationsfall wird im Folgenden Approximationslösung statt Regressionslösung genannt. Dies dient zum einen der besseren Verständlichkeit und zum anderen muss die Approximationslösung nicht das direkte Ergebnis einer eigenen Regressionsanalyse sein, sondern basiert unter Umständen nur auf Regressionsergebnissen. Alle vier Schritte zur Ableitung der drei Approximationslösungen sind in Abbildung 5.34 zusammengefasst.

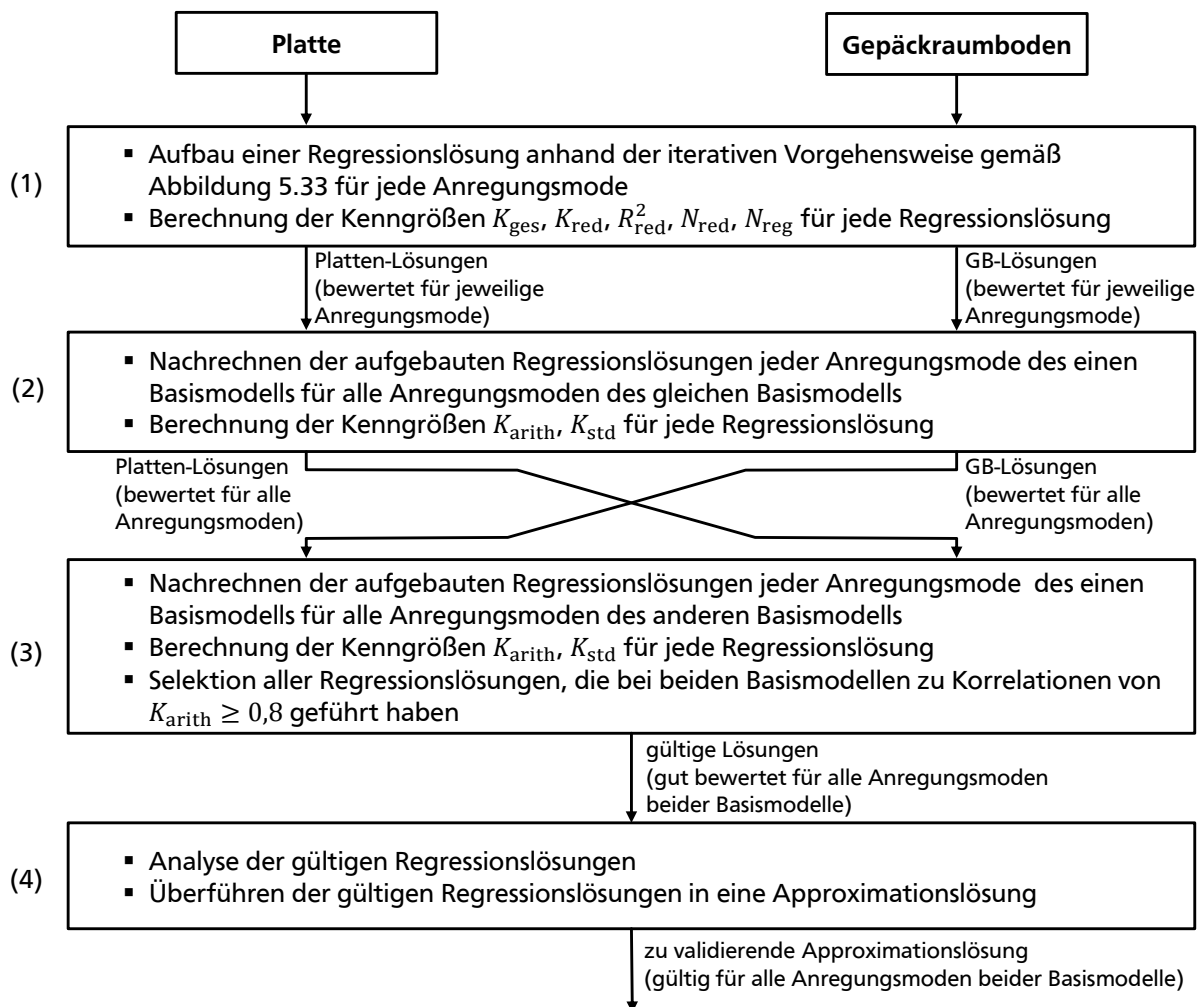


Abbildung 5.34: Vorgehensweise zur Reduktion der Regressionslösungen auf eine Approximation der ERP-Skalarfelder für jeden der drei Modifikationsfälle

Zunächst werden für den bereits ausführlich beschriebenen Schritt (1) für jede Regressionslösung fünf Kenngrößen berechnet. Dabei werden die Korrelation zwischen Regressionslösung und Regres-

sand bei Verwendung aller Regressoren K_{ges} und die Korrelation der reduzierten Regressionslösung K_{red} berechnet. Je näher die Korrelationswerte am Wert Eins liegen, desto höher ist die qualitative Ähnlichkeit zwischen der Regressionslösung und dem Regressanden. Für die Platzierung von Modifikationen anhand der approximierten ERP-Skalarfelder ist eine qualitative Approximation ausreichend, weswegen auch nur die qualitative und nicht die quantitative Ähnlichkeit zwischen der Regressionslösung und dem Regressanden bewertet wird. Weiterhin wird für jede reduzierte Regressionslösung auch das Bestimmtheitsmaß der Regression R_{red}^2 bestimmt. Je mehr sich das Bestimmtheitsmaß dem Wert Eins nähert, desto besser kann die Varianz des Regressanden durch die Varianz (Streuung) der Regressionslösung erklärt werden und desto höher ist die Anpassungsgüte der Regressionslösung [75, S. 258]. Weiterhin wird für jede reduzierte Regressionslösung ermittelt, wie viele Regressoren N_{red} in ihr enthalten sind und wie viele Regressionsdurchläufe N_{reg} zur Reduktion nötig waren.

Anschließend werden in Schritt (2) für beide Basismodelle die einzelnen Regressionslösungen, die jeweils für eine Anregungsmode aufgebaut wurden, für alle anderen Anregungsmoden nachberechnet und die Korrelationen mit den zugehörigen Regressanden bestimmt. Ziel ist es, diejenigen Regressionslösungen pro Basismodell zu identifizieren, die für alle Anregungsmoden eine gute Regressionslösung darstellen und nicht nur für diejenige Anregungsmode, für welche sie aufgebaut wurden. Der nächste Schritt (3) ähnelt Schritt (2), nur dass dieses Mal alle Regressionslösungen des einen Basismodells für alle Anregungsmoden des jeweils anderen Basismodells nachberechnet werden. Dieser Schritt ist wichtig, um die Allgemeingültigkeit der einzelnen Regressionslösungen zu überprüfen. Allgemeingültige Lösungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie unabhängig von der Struktur und damit vom Basismodell hohe Korrelationswerte aufweisen. Zudem kann so festgestellt werden, ob für die Ableitung von Approximationslösungen immer mehrere Modelle notwendig sind oder auch eines ausreichend ist. Abschließend werden in Schritt (4) die Ergebnisse der Schritte (2) und (3) ausgewertet. Basierend auf diesen Ergebnissen wird entschieden, ob der Umstand der Multikollinearität berücksichtigt werden muss oder nicht. Zuletzt werden im Rahmen der Ergebnisauswertung die einzelnen Regressionslösungen in eine verbleibende Approximationslösung pro Modifikationsfall überführt. Dies kann durch die Wahl einer gültigen Regressionslösung oder durch die Kombination mehrerer gültiger Regressionslösungen passieren. Ebenfalls denkbar ist, dass die Analyse der gültigen Regressionslösungen lediglich eine Idee für eine sinnvolle Approximationslösung liefert.

5.5.3 Ergebnisse der Approximation der ERP-Skalarfelder

Nacheinander werden nun die Ergebnisse der Schritte (1) bis (3) aus Abbildung 5.34 vorgestellt. Die Auswertung in Schritt (4) folgt in einem eigenen Abschnitt. Bei der Auswertung der ersten drei Schritte werden zunächst nur die berechneten Kennzahlen ausgewertet. Wie sich die einzelnen Regressionslösungen konkret zusammensetzen, wird dabei nicht betrachtet. Erst im letzten Schritt werden die Lösungen hinter den einzelnen Regressionsergebnissen relevant.

Die Kenngrößen aller Regressionslösungen aus Schritt (1) sind in Abbildung 5.35 zu sehen – links für die Platte und rechts für den Gepäckraumboden. Die fünf Kenngrößen bewerten die einzelnen Regressionslösungen ausschließlich in der jeweiligen Anregungsmode, für die sie aufgebaut wurden.

Bei beiden Modellen zeigt sich, dass für alle drei Modifikationsfälle in allen Anregungsmoden sehr gute Regressionslösungen gefunden werden. Die Korrelationen K_{ges} bei Verwendung aller 465 Regres-

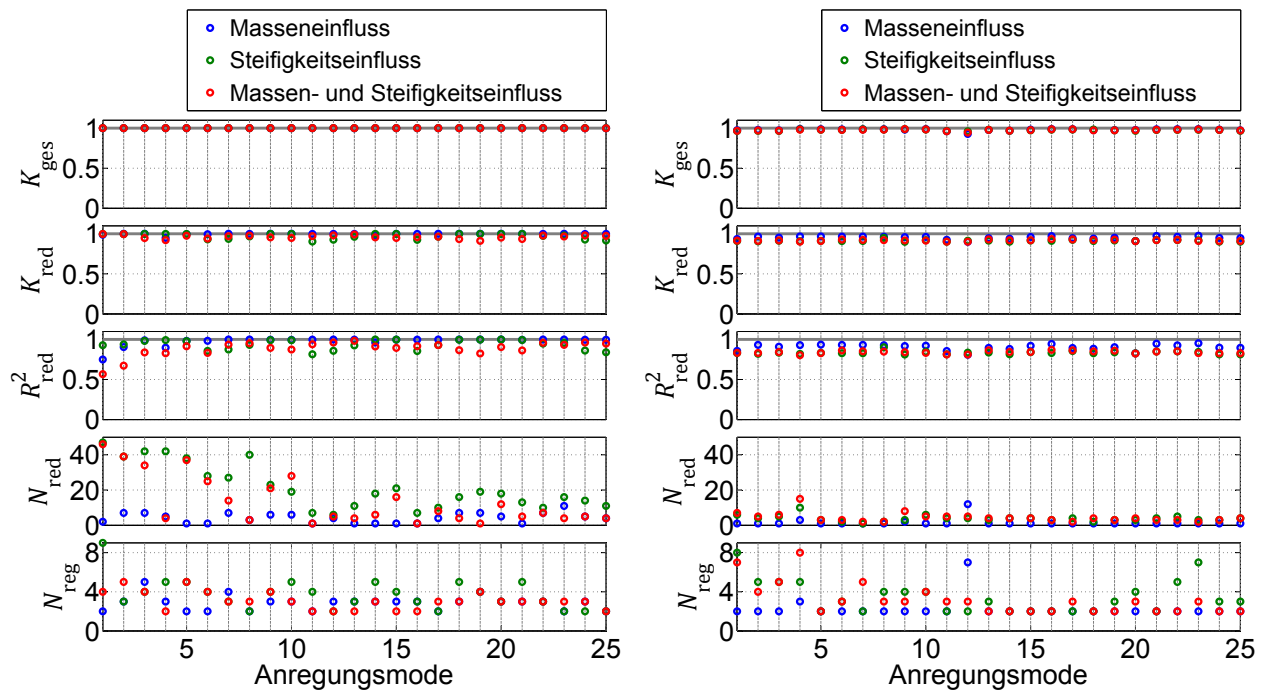


Abbildung 5.35: Regressionsergebnisse der ERP-Skalarfelder aller drei Modifikationsfälle in den einzelnen Anregungsmoden für die Platte (links) und für den Gepäckraumboden (rechts); von oben nach unten: Korrelation bei Verwendung aller Regressoren K_{ges} , Korrelation nach Reduktion der Regressoren K_{red} , Bestimmtheitsmaß der Regression nach Reduktion der Regressoren R^2_{red} , Anzahl der Regressoren nach Reduktion der Regressoren N_{red} , Anzahl der Regressionsdurchläufe zur Reduktion der Regressoren N_{reg}

soren liegt für alle Anregungsmoden bei 1,0 bei der Platte und bei mindestens 0,93 beim Gepäckraumboden. Bei den reduzierten Lösungen werden immerhin noch Korrelationen K_{red} von zwischen 0,9 und 1,0 bei der Platte und zwischen 0,9 und 0,98 beim Gepäckraumboden⁹ erzielt. Interessant ist, dass trotz der vorgegebenen Zielkorrelation von mindestens 0,9 für die reduzierte Regressionslösung bei beiden Basismodellen die meisten reduzierten Lösungen deutlich höhere Korrelationen K_{red} erreichen. Insgesamt fallen die Korrelationen K_{red} für die ERP-Skalarfelder des reinen Masseneinflusses am höchsten aus. Gleichzeitig ist die Anzahl der Regressoren N_{red} in der reduzierten Lösung bei den meisten Anregungsmoden für den Masseneinfluss am geringsten. Insgesamt weisen die reduzierten Regressionslösungen nur noch eine Anzahl N_{red} von 1 bis 47 Regressoren bei der Platte oder von 2 bis 15 Regressoren beim Gepäckraumboden auf. Die deutlich geringere Regressorenanzahl beim Gepäckraumboden war zunächst nicht zu erwarten, liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit aber an der wesentlich geringeren Multikollinearität der Regressoren. Das Bestimmtheitsmaß R^2_{red} liegt bei der Platte – mit Ausnahme der ersten beiden Anregungsmoden – bei mindestens 0,81 und beim Gepäckraumboden – über alle Anregungsmoden gesehen – bei mindestens 0,8. Damit kann die Güte der einzelnen Regressionslösungen als gut bis sehr gut bewertet werden. Je nach Anregungsmoden und Modifikationsfall wurden 2 bis 9 und 2 bis 8 Regressionsdurchläufe N_{reg} benötigt, um die Anzahl der Regressoren bei der vorgegebenen Zielkorrelation von mindestens 0,9 maximal zu senken.

⁹ Beim Gepäckraumboden wurde auch überprüft, ob Regressionslösungen mit noch höheren Korrelationen K_{red} und K_{arith} zu den ERP-Skalarfeldern erzielt werden können, wenn die ERP-Skalarfelder vor der Regression über eine Mittelung der Pegeldifferenzen der ERP zwischen benachbarten Elementen geglättet werden. Entgegen der Erwartung sind die meisten Korrelationswerte dadurch aber sogar leicht gesunken.

In Abbildung 5.36 sind der Mittelwert K_{arith} und die Standardabweichung K_{std} der Korrelation der einzelnen Regressionslösungen aus Abbildung 5.35 dargestellt, wenn die Regressionslösungen jeweils für alle 25 Anregungsmoden des gleichen Basismodells berechnet werden. Links sind die Ergebnisse für die Platte und rechts für den Gepäckraumboden zu sehen.

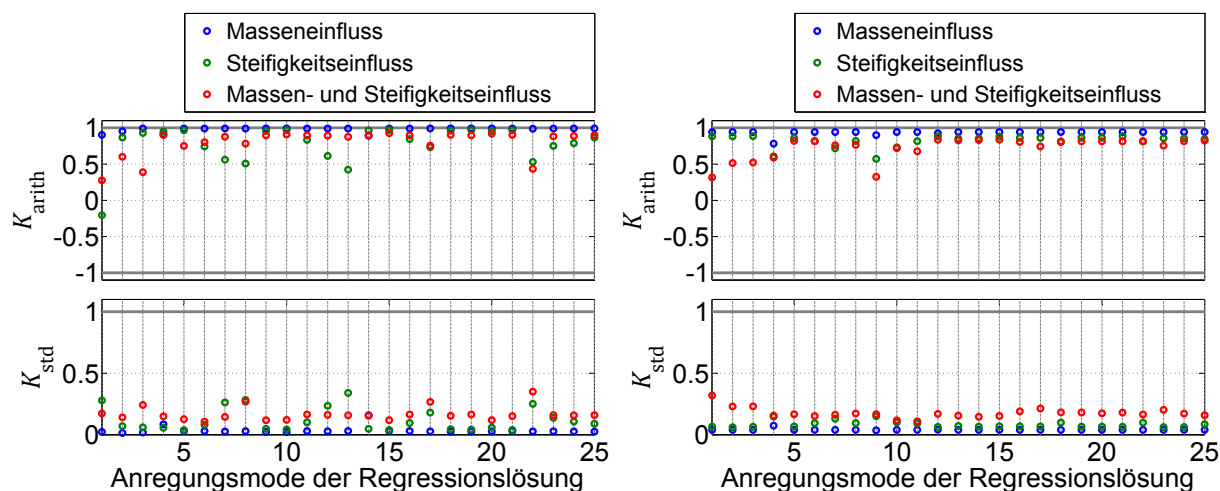


Abbildung 5.36: Regressionsergebnisse der ERP-Skalarfelder aller drei Modifikationsfälle bei Nachrechnen der Lösungen der einzelnen Anregungsmoden für alle Anregungsmoden für die Platte (links) und den Gepäckraumboden (rechts); oben: Mittelwert der Korrelation über alle Anregungsmoden K_{arith} , unten: Standardabweichung der Korrelation über alle Anregungsmoden K_{std}

Es zeigt sich, dass die über alle Anregungsmoden gemittelte Korrelation K_{arith} einer Regressionslösung meist geringer ausfällt als die Korrelation K_{red} bei alleiniger Betrachtung der zugehörigen Anregungsmoden. Dieses Verhalten war zu erwarten, nichtsdestotrotz sind auch die Korrelationsmittelwerte der meisten Regressionslösungen gut bis sehr gut. Die jeweils besten Lösungen für die einzelnen Modifikationsfälle weisen bei der Platte Korrelationsmittelwerte von 1,0, 0,97 und 0,92 für den Massen-, den Steifigkeits- bzw. den Massen- und Steifigkeitseinfluss auf. Beim Gepäckraumboden liegen die Korrelationsmittelwerte etwas niedriger, sind bei den jeweils besten Lösungen für den Massen-, den Steifigkeits- sowie den Massen- und Steifigkeitseinfluss mit 0,94, 0,89 bzw. 0,84 aber immer noch gut. Diese Ergebnisse zeigen, dass die meisten Regressionslösungen allgemeingültig in Bezug auf die Anregungsmoden beim gleichen Basismodell sind.

Im nächsten Schritt wird überprüft, wie gut die einzelnen Regressionslösungen beim jeweils anderen Basismodell abschneiden. Die Korrelationsmittelwerte und -standardabweichungen dieser Untersuchungen – Schritt (3) in Abbildung 5.34 – sind in Abbildung 5.37 zusammengestellt.

Es fällt auf, dass die Regressionslösungen der Platte mit Ausnahme einiger weniger Lösungen, die für den Masseneinfluss aufgestellt wurden, keine Gültigkeit beim Gepäckraumboden besitzen. Hier liegen die Korrelationsmittelwerte weit unterhalb von 0,8 – meist sogar nahe 0. Umgekehrt sind die meisten Lösungen, die für den Gepäckraumboden aufgestellt wurden, auch bei der Platte gültig. Teils erreichen die Regressionslösungen des Gepäckraumbodens bei der Platte sogar höhere Korrelationsmittelwerte als beim Gepäckraumboden selbst. Die Korrelationsmittelwerte der jeweils besten Gepäckraumboden-Lösungen für den Massen-, den Steifigkeits- sowie den Massen- und Steifigkeitseinfluss betragen bei der Platte 0,99, 0,87 bzw. 0,92. Diese Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, auf Basis der einzelnen Regressionslösungen je eine Approximationslösung pro Modifikationsfall abzulei-

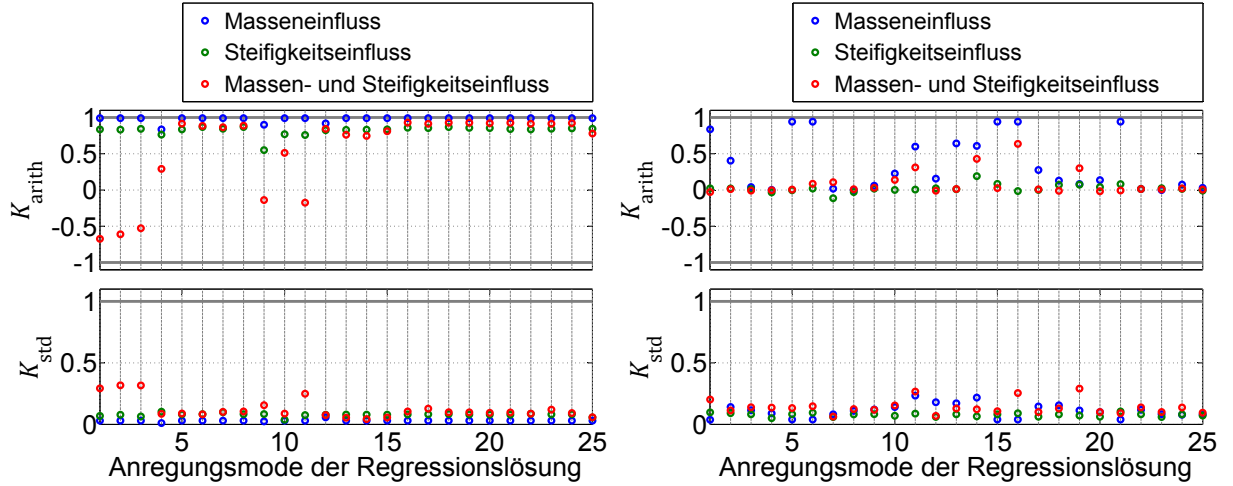


Abbildung 5.37: Regressionsergebnisse der ERP-Skalarfelder aller drei Modifikationsfälle bei Nachrechnen der Lösungen des jeweils anderen Basismodells der einzelnen Anregungsmoden für alle Anregungsmoden für die Platte (links) und den Gepäckraumboden (rechts); oben: Mittelwert der Korrelation über alle Anregungsmoden K_{arith} , unten: Standardabweichung der Korrelation über alle Anregungsmoden K_{std}

ten. Dabei sollten allerdings nur die Lösungen des Gepäckraumbodens weiter ausgewertet werden, da das Plattenmodell bis auf wenige Ausnahmen keine allgemeingültigen Lösungen für gekrümmte Strukturen liefert.

5.5.4 Ableitung von Modifikationsregeln durch Analyse der einzelnen Regressionslösungen

Die Analyse der konkreten Regressionslösungen des Gepäckraumbodens (Schritt (4) in Abbildung 5.34) zu deren Reduktion auf jeweils eine Approximationslösung pro Modifikationsfall (Massen-, Steifigkeits- sowie Massen- und Steifigkeitseinfluss) erfolgt nacheinander in jeweils zwei Schritten. Im ersten Schritt werden nur die verwendeten Regressoren \vec{X}_q und im zweiten Schritt auch die zugehörigen Regressionskoeffizienten β_q betrachtet, siehe Gleichung (5.1). Die Koordinatenrichtungen x , y und z in den Indizes der Strukturgrößenvektoren in diesem Abschnitt bezeichnen die lokalen Koordinatenrichtungen. Die z -Richtung entspricht somit immer der Richtung normal zur Strukturoberfläche am Ort des jeweiligen Elementes. Weiterhin handelt es sich bei den Regressoren um die standardisierten Regressoren, so wie sie in der vorangegangenen Regressionsanalyse verwendet wurden (Schritt (2) in Abbildung 5.33). Zuletzt werden die Modifikationsregeln der drei Modifikationsfälle basierend auf den Approximationslösungen formuliert.

Approximation der ERP-Skalarfelder des reinen Masseneinflusses

Die gültigen Regressionslösungen des Gepäckraumbodens für die Approximation der ERP-Skalarfelder des reinen Masseneinflusses sind bzgl. der Regressoren in fast allen Anregungsmoden identisch. In 22 der 25 Anregungsmoden besteht die Regressionslösung lediglich aus einem Regressor. Dabei handelt es sich um das standardisierte Produkt aus Real- und Imaginärteil der Schwinggeschwindigkeit in lokaler z -Richtung, sodass die gesuchte Approximationslösung

$$R_m = \beta_1 [\vec{V}G_{3, \text{re}} \vec{V}G_{3, \text{im}}]_{\text{std}} \quad (5.2)$$

$$= \beta_1 [V_{z, \text{re}} V_{z, \text{im}}]_{\text{std}} = [V_{z, \text{re}} V_{z, \text{im}}]_{\text{std}} \quad (5.3)$$

lautet. Mit der Notation $[XY]_{\text{std}}$ werden in dieser Arbeit standardisierte Produkte $XY = Z$ gekennzeichnet

$$[XY]_{\text{std}} = [Z]_{\text{std}} = \frac{Z - Z_{\text{arith}}}{Z_{\text{std}}}, \quad (5.4)$$

welche sich dadurch kennzeichnen, dass sie einen Mittelwert Z_{arith} von Null und eine Standardabweichung Z_{std} von Eins aufweisen. Alle Regressionslösungen der Platte, die auch beim Gepäckraumboden zu hohen Korrelationsmittelwerten $K_{\text{arith}} \geq 0,9$ führen, sind mit Gleichung (5.2) identisch. Diese hohe Übereinstimmung der Regressionslösungen in Kombination mit der Kürze der Approximationslösung R_m (nur 1 Regressor) zeigt, dass Multikollinearität unter den Regressoren zu Beginn der Regressionsanalyse für diesen Fall – die Approximation der ERP-Skalarfelder des reinen Masseneinflusses – ignoriert werden darf. Da die Lösung R_m nur einen Regressor beinhaltet, kann der zugehörige Regressionskoeffizient β_1 – unabhängig von den Werten in den einzelnen Regressionslösungen – auf Eins gesetzt werden, da eine qualitative Approximation der ERP-Skalarfelder zur Ableitung der Modifikationsregeln ausreicht.

Approximation der ERP-Skalarfelder des reinen Steifigkeitseinflusses

Die unterschiedlichen Regressionslösungen des Gepäckraumbodens für die Approximation der ERP-Skalarfelder des reinen Steifigkeitseinflusses sind weniger eindeutig, da sich die Lösungen stärker voneinander unterscheiden. Allerdings ist ein klarer Trend zu erkennen. Insgesamt 20 der 25 Regressionslösungen weisen nur Regressoren auf, die einem standardisierten Produkt aus Real- und Imaginärteil der gleichen Schnittgröße ($\vec{X}_q = [\vec{SG}_{i,\text{re}} \cdot \vec{SG}_{i,\text{im}}]_{\text{std}}$) entsprechen. Mit einem fünffachen Auftreten ist die Regressionslösung, welche die vier Schnittgrößen \underline{M}_x , \underline{M}_y , \underline{N}_x und \underline{N}_y beinhaltet, die am häufigsten vorkommende Regressionslösung. Dahinter folgen drei Teilmengen aus erstens \underline{M}_x , \underline{M}_y und \underline{N}_y , zweitens \underline{M}_x , \underline{M}_y und \underline{N}_x sowie drittens \underline{M}_x und \underline{M}_y . Die Regressionslösung, die beim Gepäckraumboden die höchste mittlere Korrelation erzielt, umfasst neben den vier Schnittgrößen \underline{M}_x , \underline{M}_y , \underline{N}_x und \underline{N}_y auch noch die Schnittkraft \underline{N}_{xy} . Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sich auch die gesuchte Approximationslösung R_k aus der gewichteten Superposition von standardisierten Produkten aus den Real- und Imaginärteilen der gleichen Schnittgrößen zusammensetzt:

$$R_k = \sum_{q=1}^9 \beta_q [\vec{SG}_{q,\text{re}} \vec{SG}_{q,\text{im}}]_{\text{std}}, \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} &= \beta_1 [\underline{M}_{x,\text{re}} \underline{M}_{x,\text{im}}]_{\text{std}} + \beta_2 [\underline{M}_{y,\text{re}} \underline{M}_{y,\text{im}}]_{\text{std}} + \beta_3 [\underline{M}_{xy,\text{re}} \underline{M}_{xy,\text{im}}]_{\text{std}} \\ &+ \beta_4 [\underline{N}_{x,\text{re}} \underline{N}_{x,\text{im}}]_{\text{std}} + \beta_5 [\underline{N}_{y,\text{re}} \underline{N}_{y,\text{im}}]_{\text{std}} + \beta_6 [\underline{N}_{xy,\text{re}} \underline{N}_{xy,\text{im}}]_{\text{std}} \\ &+ \beta_7 [\underline{Q}_{x,\text{re}} \underline{Q}_{x,\text{im}}]_{\text{std}} + \beta_8 [\underline{Q}_{y,\text{re}} \underline{Q}_{y,\text{im}}]_{\text{std}}. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Ob alle oder nur ein Teil der Schnittgrößen Teil der gesuchten Approximationslösung R_k sind, ist noch zu überprüfen. Die Normalkraft \underline{N}_z wird nicht berücksichtigt, da sie bei Platte und Gepäckraumboden konstant Null ist. Erste händische Variationen der Regressionskoeffizienten β_1 bis β_8 in Gleichung (5.6) zeigen, dass sowohl bei der Platte als auch beim Gepäckraumboden mit einer Approximation der ERP-Skalarfelder basierend auf Gleichung (5.6) höhere Korrelationsmittelwerte erreichbar sind, als sie durch die Regressionsanalysen erzielt wurden. Beispielsweise können mit $\beta_1 = \beta_2 = 0,5$,

$\beta_3 = 0,3$, $\beta_4 = \beta_5 = 0,2$, $\beta_6 = 0,1$ und $\beta_8 = \beta_9 = 0$ Korrelationsmittelwerte von 0,89 beim Gepäckraumboden und gleichzeitig 0,94 bei der Platte erreicht werden, was einer mittleren Korrelation von 0,92 entspricht. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Regressionsanalysen zwar keine optimale Lösung geliefert haben, aber einen guten Ansatz für eine passende Approximationslösung, sodass auch hier die Multikollinearität der Regressoren nicht weiter beachtet werden muss.

Um die optimalen Werte für die einzelnen Regressionskoeffizienten zu finden, wird eine Optimierung in Matlab durchgeführt. Die zu minimierende Zielfunktion $f(\vec{\beta})$ entspricht dabei der Differenz zwischen 1 und dem Mittelwert der Korrelationsmittelwerte K_{arith} von Platte und Gepäckraumboden

$$f(\vec{\beta}) = 1 - \frac{K_{arith,Platte}(\vec{\beta}) + K_{arith,GB}(\vec{\beta})}{2}, \quad (5.7)$$

da die gesuchte Lösung die ERP-Skalarfelder aller Anregungsmoden beider Modelle so gut wie möglich abbilden soll. Die Regressionskoeffizienten werden als Designvariablen mit einem Wertebereich zwischen 0 und 1 definiert, wobei β_1 und β_2 , β_4 und β_5 sowie β_7 und β_8 jeweils als eine Designvariable betrachtet werden, da sie zu gleichen Schnittgrößen gehören, die sich lediglich durch eine andere Koordinatenrichtung bei der Wirk- oder Drehrichtung (x oder y) unterscheiden. Damit reduzieren sich die acht Regressionskoeffizienten auf fünf Designvariablen für die Optimierung. Als Optimierungsalgorithmus wird ein genetischer Algorithmus¹⁰ (Matlab-Funktion *ga*) angewendet. Die verwendeten Optimierungseinstellungen können Tabelle A.10 im Anhang entnommen werden. Eine detaillierte Beschreibung der Einstellungen ist in [79] zu finden. Das Ergebnis der Optimierung führt zur Approximationslösung der ERP-Skalarfelder des reinen Steifigkeitseinflusses

$$\begin{aligned} R_k = & 1,0 [M_{x,re} M_{x,im}]_{std} + 1,0 [M_{y,re} M_{y,im}]_{std} + 0,6388 [M_{xy,re} M_{xy,im}]_{std} \\ & + 0,2525 [N_{x,re} N_{x,im}]_{std} + 0,2525 [N_{y,re} N_{y,im}]_{std} + 0,2645 [N_{xy,re} N_{xy,im}]_{std} \\ & + 0,0296 [Q_{x,re} Q_{x,im}]_{std} + 0,0296 [Q_{y,re} Q_{y,im}]_{std}, \end{aligned} \quad (5.8)$$

wobei die Regressionskoeffizienten so skaliert sind, dass der höchste Regressionskoeffizient den Wert Eins erhält. Die Produkte der Schnittmomente tragen den größten Anteil zur Approximation bei. Der Einfluss der Querkraftprodukte ist dagegen vernachlässigbar gering. Die Lösung gemäß Gleichung (5.8) führt nach 71 Generationen zu einer Zielfunktion von $f(\vec{\beta}) = 1 - 0,92$, wobei die Korrelationsmittelwerte bei Gepäckraumboden und Platte 0,88 bzw. 0,95 betragen. Damit unterscheidet sich die optimierte Lösung hinsichtlich dieser Werte nur minimal von der per Hand gefundenen Lösung.

Approximation der ERP-Skalarfelder des Massen- und Steifigkeitseinflusses

Im Rahmen der Analysen der ERP-Skalarfelder in Abschnitt 5.2 wird gezeigt, dass die ERP-Skalarfelder des gemeinsamen Massen- und Steifigkeitseinflusses der Superposition der ERP-Skalarfelder des reinen Massen- und des reinen Steifigkeitseinflusses entsprechen, siehe Abbildung 5.8. Aus diesem Grund können auch die Approximationslösungen R_m und R_k (Gleichungen (5.3) bzw. (5.8)) zur

¹⁰ Alternativ wurden auch Optimierungen mit der Matlab-Funktion *fmincon* mit Standardeinstellungen – sowohl mit einem als auch mit mehreren Startpunkten – durchgeführt. Diese haben zu gleichen oder minimal schlechteren Werten der Zielfunktion geführt.

Approximationslösung R_{mk} der ERP-Skalarfelder des Massen- und Steifigkeitseinflusses im Hinblick auf die verwendeten Regressoren superponiert werden

$$\begin{aligned}
 R_{mk} = & \beta_1 [V_{z, \text{re}} V_{z, \text{im}}]_{\text{std}} + \beta_2 [M_{x, \text{re}} M_{x, \text{im}}]_{\text{std}} + \beta_2 [M_{y, \text{re}} M_{y, \text{im}}]_{\text{std}} \\
 & + \beta_3 [M_{xy, \text{re}} M_{xy, \text{im}}]_{\text{std}} + \beta_4 [N_{x, \text{re}} N_{x, \text{im}}]_{\text{std}} + \beta_4 [N_{y, \text{re}} N_{y, \text{im}}]_{\text{std}} \\
 & + \beta_5 [N_{xy, \text{re}} N_{xy, \text{im}}]_{\text{std}} + \beta_6 [Q_{x, \text{re}} Q_{x, \text{im}}]_{\text{std}} + \beta_6 [Q_{y, \text{re}} Q_{y, \text{im}}]_{\text{std}} .
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Die Werte der Regressionskoeffizienten β_1 bis β_6 sind dagegen neu zu bestimmen, da die beiden Approximationslösungen R_m und R_k nur unter qualitativen Aspekten aufgestellt wurden und somit ein Skalierungsunterschied zwischen ihnen bestehen kann.

Prinzipiell sind zwei Varianten zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten für die Lösung R_{mk} möglich. Entweder werden alle Regressionskoeffizienten erneut als Designvariablen für einen Optimierungsdurchlauf definiert oder die Regressionskoeffizienten des Steifigkeitsanteils β_2 bis β_6 werden gemäß Gleichung (5.6) im Verhältnis zueinander vorgegeben und nur der Regressionskoeffizient des Massenanteils β_1 wird als Designvariable deklariert. Eine dritte Variante, den Regressionskoeffizienten des Massenanteils als Summe der Regressionskoeffizienten des Steifigkeitsanteils zu definieren, ist nicht zielführend, da, wie bereits erwähnt, ein Skalierungsunterschied aufgrund der Standardisierung der Regressoren vorliegen kann. Die Unterschiede in den Korrelationsmittelwerten der beiden zuerst benannten Varianten liegen in der dritten Nachkommastelle und sind damit als gleichwertig anzusehen. Weiter verwendet werden die Ergebnisse der zweiten Variante, da diese Optimierungslösung einer gewichteten Superposition der Einzellösungen R_m und R_k entspricht. Dabei werden die gleichen Optimierungseinstellungen wie bei der Optimierung der Steifigkeitslösung verwendet. Die vorgegebenen Regressionskoeffizienten der Steifigkeitslösung werden für die Optimierung allerdings um den Faktor 10 reduziert, damit der Massenanteil sowohl größer als auch kleiner als der Steifigkeitsanteil werden kann (zur Erinnerung: die Designvariablen sind auf den Bereich zwischen 0 und 1 beschränkt und der maximale Regressionskoeffizient der Steifigkeitslösung besitzt bereits den Wert 1). Nach 51 Generationen ergibt sich die Approximationslösung

$$\begin{aligned}
 R_{mk} = & 1,0 [V_{z, \text{re}} V_{z, \text{im}}]_{\text{std}} + 0,2328 [M_{x, \text{re}} M_{x, \text{im}}]_{\text{std}} + 0,2328 [M_{y, \text{re}} M_{y, \text{im}}]_{\text{std}} \\
 & + 0,1487 [M_{xy, \text{re}} M_{xy, \text{im}}]_{\text{std}} + 0,0588 [N_{x, \text{re}} N_{x, \text{im}}]_{\text{std}} + 0,0588 [N_{y, \text{re}} N_{y, \text{im}}]_{\text{std}} \\
 & + 0,0616 [N_{xy, \text{re}} N_{xy, \text{im}}]_{\text{std}} + 0,0069 [Q_{x, \text{re}} Q_{x, \text{im}}]_{\text{std}} + 0,0069 [Q_{y, \text{re}} Q_{y, \text{im}}]_{\text{std}} ,
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

wobei alle Regressionskoeffizienten erneut so skaliert sind, dass der höchste Koeffizient den Wert Eins besitzt. Diese Lösung führt zu einer Zielfunktion von $f(\vec{\beta}) = 1 - 0,9$, wobei Korrelationsmittelwerte von 0,84 und 0,95 für den Gepäckraumboden bzw. die Platte erzielt werden. Damit liegt die Approximationsgüte von R_{mk} gemessen an den Korrelationswerten unterhalb der Güte der Einzellösungen R_m und R_k .

Formulierung der Modifikationsregeln

Ziel der durchgeführten Approximation der ERP-Skalarfelder anhand der Strukturgrößen der Basismodelle ist es, darauf basierend neue Modifikationsregeln aufzustellen. Diese neuen Modifikationsregeln

sollen es ermöglichen, dünnwandige Strukturen in einer ausgewählten Frequenz allein mit der Kenntnis der Strukturgrößen und ohne die aufwändige Erstellung der ERP-Skalarfelder so modifizieren zu können, dass beispielsweise die ERP dieser Struktur in der gewählten Frequenz sinkt. Diese Modifikationsregeln leiten sich direkt aus den Approximationslösungen R_m , R_k und R_{mk} (Gleichungen (5.3), (5.8) bzw. (5.10)) ab. Die jeweiligen Modifikationsregeln der drei Modifikationsfälle entsprechen letztendlich der Platzierung von Modifikationen in den Minima oder Maxima der Approximationslösungen – je nachdem, ob die Reduktion oder Erhöhung der ERP-Pegel das Ziel ist. Somit lauten die Modifikationsregeln:

„Zur Reduktion oder Erhöhung der ERP einer dünnwandigen Struktur sind die Masse, die Steifigkeit oder Masse und Steifigkeit an den Orten mit den geringsten bzw. höchsten Werten in den Skalarfeldern gemäß der Approximationsgleichungen R_m , R_k und R_{mk} (Gleichungen (5.3), (5.8) bzw. (5.10)) zu erhöhen.“

Die konkreten Werte für die Modifikationsfläche und den Umfang der Massen- und/oder Steifigkeitserhöhung sind dabei an das entsprechende Modell und die entsprechende Frequenz anzupassen und müssen iterativ ermittelt werden.

5.6 Validierung der abgeleiteten Modifikationsregeln

Zur Validierung der Modifikationsregeln werden zunächst die Skalarfelder gemäß der Approximationslösungen für den Massen-, den Steifigkeits- sowie den Massen- und Steifigkeitseinfluss aus Abschnitt 5.5.4 als „Landkarten“ für die beiden Basismodelle, Platte und Gepäckraumboden, sowie ein drittes, bisher nicht betrachtetes und damit unabhängiges Modell aufgebaut. Diese „Landkarten“ werden jeweils für die ersten 25 Anregungsmoden berechnet. Anschließend werden, basierend auf den „Landkarten“, gemäß der Vorgehensweise aus Abschnitt 5.3 Modifikationen sowohl für eine gezielte Reduktion als auch für eine gezielte Erhöhung der ERP-Pegel positioniert und ihre Auswirkungen auf die ERP-Pegel untersucht. Dabei werden erneut alle Modifikationsgrößen gemäß der Grenzwerte aus Tabelle 5.2 und alle Modifikationseinstellungen aus Tabelle 5.3 verwendet. Beim Gepäckraumboden und beim dritten Modell werden zusätzlich noch Modifikationen mit einer geringeren Masse (10 g oder Dicke des Basismodells/10) und/oder einer geringeren Steifigkeit (Dicke des Basismodells/10) hinzugefügt. Die resultierenden modifizierten Modelle werden in Analogie zu den anhand der ERP-Skalarfelder modifizierten Modelle ($ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ und $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$) im Folgenden $R_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ und $R_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ genannt, wobei X auch hier den Grenzwert für die Flächengröße angibt und $1 \dots 25$ die Gesamtheit aller Auslegungsmoden. Im Rahmen der Validierung wird sich auch zeigen, welchen Einfluss die Abweichung der Korrelationswerte, zwischen den Approximationslösungen und den ERP-Skalarfeldern, vom Wert Eins auf die gezielte Reduktion oder Erhöhung der ERP-Pegel anhand der Approximationslösungen im Vergleich zur gezielten Pegelreduktion oder -erhöhung anhand der ERP-Skalarfelder hat. Zum Abschluss erfolgt noch eine experimentelle Validierung.

5.6.1 Anwendung an den verwendeten Basismodellen

Nacheinander werden für die Platte und den Gepäckraumboden ausgewählte Ergebnisse von Modifikationseinstellungen gezeigt, die in Abschnitt 5.3 zu guten Ergebnissen bei den jeweiligen Basismodellen geführt haben. Für beide Modelle die Ergebnisse der gleichen Modifikationseinstellungen zu zeigen, wäre nicht zielführend, da sich in Abschnitt 5.3 herausgestellt hat, dass unterschiedlich

hohe Massen bei Platte und Gepäckraumboden zu guten Ergebnissen führen. Da die Platte bei kleineren Abmessungen für Länge und Breite deutlich dicker als der Gepäckraumboden ist, führen in den meisten Fällen beispielsweise höhere Massen zu größeren Pegelreduktionen als kleinere. Beim Gepäckraumboden dagegen verhält es sich größtenteils genau umgekehrt. Für beide Modelle werden zudem für alle drei Modifikationsfälle die Zusammenfassungen der maximal erzielten Reduktionen und Erhöhungen der ERP-Pegel gegeben.

In Abbildung 5.38 sind die Ergebnisse der Plattenmodelle $R_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ (oben) und $R_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ (unten) für die beiden Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) beim Modifikationsfall 3 dargestellt (Masse konstant bei 1 kg bzw. 0,1 kg, wobei der Elastizitätsmodul um den gleichen Faktor wie die Dichte im Verhältnis zu Stahl verändert wird). Aufgetragen sind jeweils die Pegeldifferenzen zwischen den ERP-Pegeln der modifizierten Modelle und den ERP-Pegeln des Basismodells.

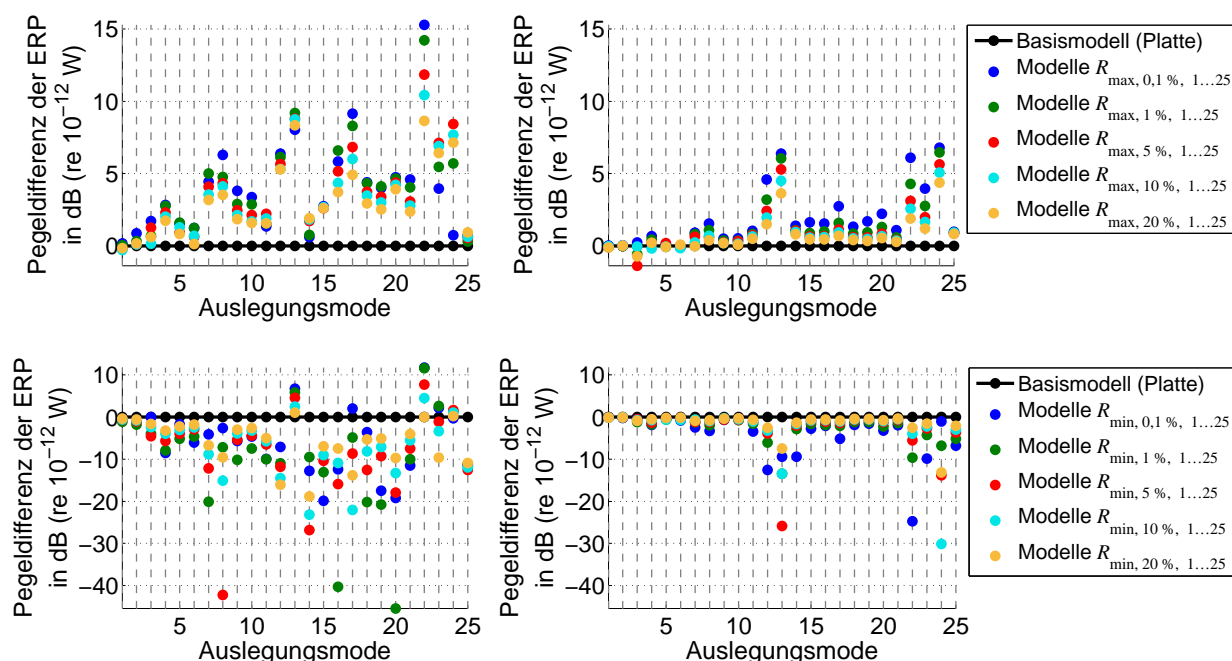


Abbildung 5.38: Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $R_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ (oben) und $R_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ (unten) bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 (links) und Nr. 3 (rechts) bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses

Die Änderungen der ERP-Pegel der Modelle $R_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ und $R_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ sind bei gleichen Modifikationseinstellungen sehr ähnlich zu denen der Modelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ und $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$, vergleiche Abbildung 5.25. Auf eine Differenzdarstellung zwischen den Pegeldifferenzen aufgrund von Modifikationen basierend auf den ERP-Skalarfeldern bzw. aufgrund von Modifikationen basierend auf den Approximationslösungen wird verzichtet, da mit der Validierung ausschließlich überprüft werden soll, ob basierend auf den Approximationslösungen ebenfalls gezielte Reduktionen oder Erhöhungen der ERP-Pegel möglich sind. Ob diese Pegeländerungen die gleichen Werte wie vorher aufweisen, ist unerheblich. Abbildung 5.38 zeigt, dass dies erneut der Fall ist. Die Pegeländerungen der Modelle $R_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ und $R_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ sind auch für alle anderen untersuchten Modifikationseinstellungen und für alle Modifikationsfälle sehr ähnlich zu denen der Modelle $ERP_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ und $ERP_{\min, X \% , 1 \dots 25}$, sodass die dortigen Aussagen übertragbar sind. Dieses Ergebnis war bei der Platte wegen der hohen Korrelationen zwischen den Approximationslösungen und den ERP-Skalarfeldern zu erwarten.

Die Zusammenfassung der maximal erzielten Reduktionen und Erhöhungen der ERP-Pegel ist für alle drei Modifikationsfälle in Abbildung 5.39 gegeben. Für diese Zusammenfassung wird für jede der 25 Auslegungsmoden und für jeden der drei Modifikationsfälle die maximale Pegelreduktion oder -erhöhung, über alle Modifikationseinstellungen hinweg, bei verschiedenen Anforderungen an die maximal erlaubte Änderung der Eigenfrequenzen (beliebig, 10 %, 5 % und 2 %) selektiert. Die Balken geben jeweils den Wertebereich dieser 25 Werte an und die schwarzen Linien markieren den Mittelwert dieser 25 Werte.

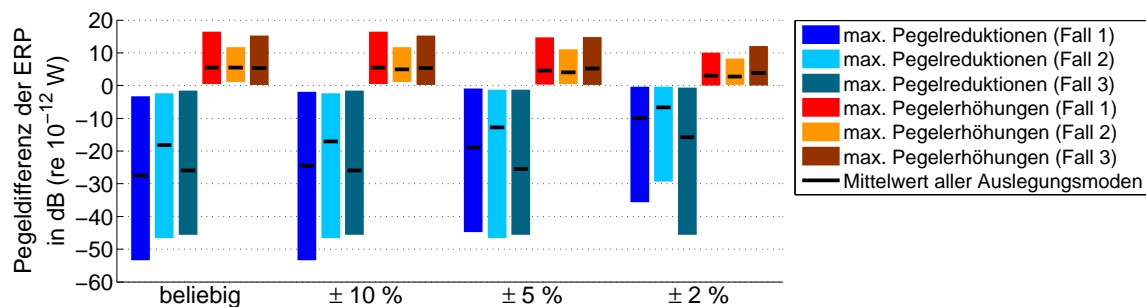


Abbildung 5.39: Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP bei der Platte für alle Auslegungsmoden, alle Modifikationseinstellungen sowie alle drei Modifikationsfälle (Massen-, Steifigkeits- sowie Massen- und Steifigkeitseinfluss) bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen

Die Zusammenfassung bestätigt die hohe Ähnlichkeit zwischen den Approximationslösungen und den ERP-Skalarfeldern, da die Balken und die Mittelwerte der Pegeldifferenzen ähnlich zu denen aus den vorangegangenen Untersuchungen sind (siehe Abbildungen 5.20, 5.24 bzw. 5.29). Im Falle des dritten Modifikationsfalls (Massen- und Steifigkeitseinfluss) sinken für alle Anforderungen an die Eigenfrequenzänderungen die kleinsten maximalen Pegelreduktionen – alle Balken reichen näher an eine Pegeldifferenz von Null heran. Dafür werden dort in allen Fällen höhere Mittelwerte der Pegelreduktionen erzielt. Dies bedeutet, dass es zwar Auslegungsmoden gibt, in denen die maximal erzielte Pegelreduktion sinkt, aber dass in den meisten Auslegungsmoden auf Basis der Approximationslösungen mit einer Massen- und Steifigkeitserhöhung sogar eine höhere Pegelreduktion bewirkt wird als auf Basis der entsprechenden ERP-Skalarfelder.

Exemplarisch für den Gepäckraumboden sind in Abbildung 5.40 die Ergebnisse der Modelle $R_{\max, X \%, 1...25}$ (oben) und $R_{\min, X \%, 1...25}$ (unten) für eine konstante Masse von 0,1 kg (links) und 0,01 kg (rechts) zu sehen (Änderung des Stahl-Elastizitätsmoduls um den gleichen Faktor wie die Dichte).

Ein Vergleich der Pegeländerungen in Abbildung 5.40 mit den Abbildungen 5.27 (links) und 5.28, in denen die entsprechenden Pegeländerungen bei einer Platzierung der Modifikationen anhand der ERP-Skalarfelder zu sehen sind, zeigt, dass Modifikationen basierend auf den Approximationslösungen auch beim Gepäckraumboden zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen wie Modifikationen basierend auf den ERP-Skalarfeldern. Dies trifft für alle Modifikationseinstellungen und alle drei Modifikationsfälle zu. Damit gelten auch beim Gepäckraumboden die in Abschnitt 5.3 getroffenen Aussagen.

Die maximal erzielten Reduktionen und Erhöhungen der ERP-Pegel beim Gepäckraumboden sind für alle drei Modifikationsfälle in Abbildung 5.41 zusammengefasst.

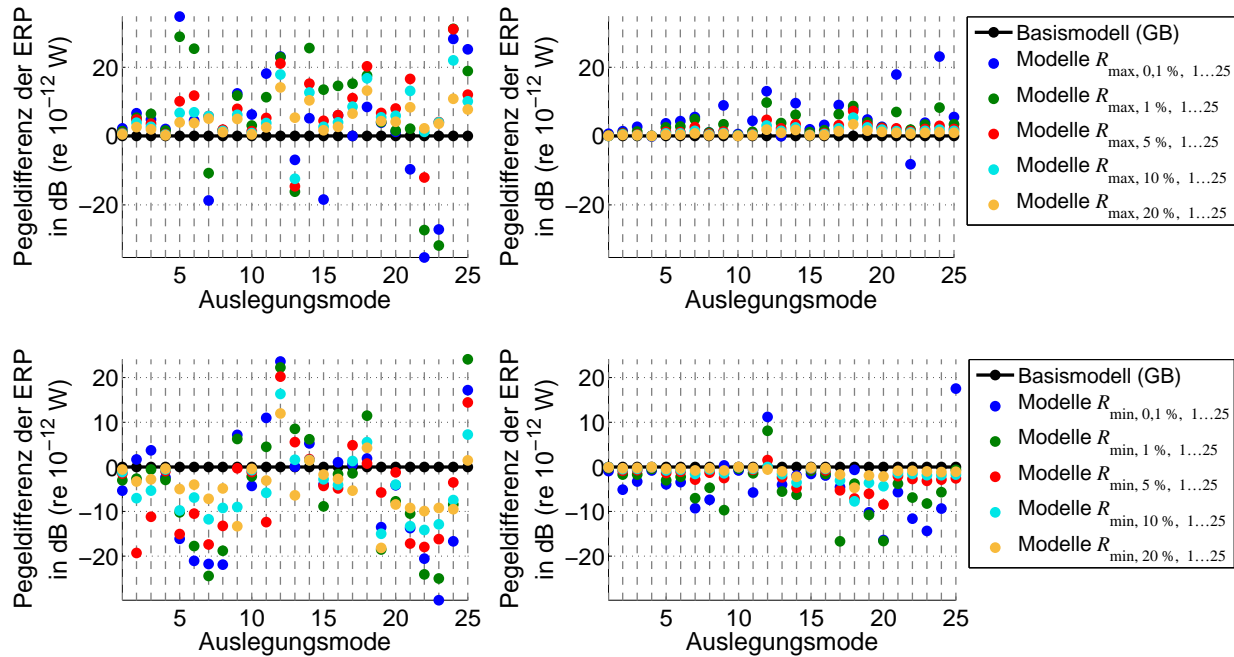


Abbildung 5.40: Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $R_{\max, X \%}$, 1...25 (oben) und $R_{\min, X \%}$, 1...25 (unten) bzgl. des Basismodells für Massenerhöhungen um 0,1 kg (links) und um 0,01 kg (rechts) bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses

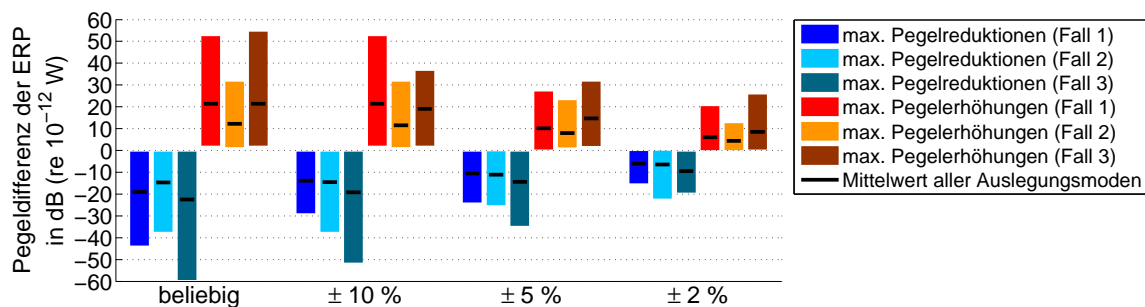


Abbildung 5.41: Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP beim Gepäckraumboden für alle Auslegungsmoden, alle Modifikationseinstellungen sowie alle drei Modifikationsfälle (Massen-, Steifigkeits- sowie Massen- und Steifigkeitseinfluss) bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen

Im Vergleich zu den Ergebnissen basierend auf den ERP-Skalarfeldern (siehe Abbildungen 5.20, 5.24 und 5.29) sind die maximal erzielten Pegeländerungen und die zugehörigen Mittelwerte in den meisten Fällen um 0,1 dB bis 1,0 dB gesunken. Dennoch werden auch basierend auf den Approximationslösungen sehr gute Ergebnisse erzielt. Bei einer maximal erlaubten Änderung der Eigenfrequenzen von nur $\pm 2\%$ werden im Mittel über alle Auslegungsmoden weiterhin Pegelreduktion von 6,1 dB, 6,4 dB und 9,4 dB bei einer Erhöhung der Masse, der Steifigkeit bzw. der Masse und Steifigkeit erzielt.

Die vorhandenen Unterschiede zwischen den Approximationslösungen und den ERP-Skalarfeldern, auf die durch die berechneten Korrelationswerte kleiner Eins hingewiesen wird, führen nicht dazu, dass die Approximationslösungen als „Landkarte“ für die Platzierung von Modifikationen ungültig werden. Somit können die gefundenen Approximationslösungen und damit die daraus abgeleiteten Modifikationsregeln als gültig für die Platte und für den Gepäckraumboden angesehen werden. Der erste Teil der Validierung ist damit erfolgreich abgeschlossen.

5.6.2 Anwendung an einem weiteren Modell

Zur Validierung der Modifikationsregeln an einem weiteren unabhängigen Modell wird ein Wagenbodenblech eines Pkws verwendet, siehe Abbildung 5.42.

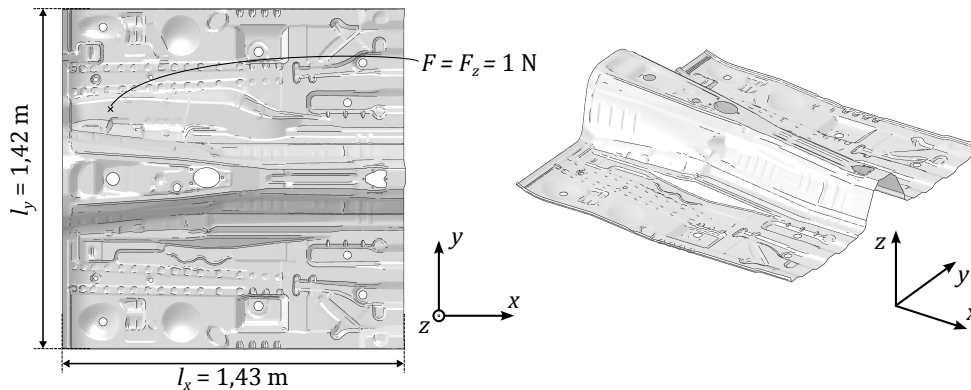


Abbildung 5.42: Basismodell des Wagenbodens

Das Wagenbodenblech, das dankenswerterweise von STOEWER [47] zur Verfügung gestellt wird, weist eine Dicke von 0,7 mm auf und wird aus Stahl modelliert. Dabei werden die gleichen Materialparameter wie beim Gepäckraumboden (siehe Abschnitt 3.2.1) verwendet. Dies resultiert in einer Gesamtmasse des Modells von 13,9 kg. Das Wagenbodenblech ist an allen Außenkanten gelenkig gelagert. Vernetzt ist das Modell wie auch der Gepäckraumboden mit linearen Drei- und Viereckselementen (S3R, S4R) mit einer durchschnittlichen Kantenlänge von ca. 10 mm. Die untersuchten 25 Anregungsfrequenzen (=Eigenfrequenzen) liegen zwischen 45,3 Hz und 185,6 Hz. Durchschnittlich weist die Vernetzung damit mindestens 50 Elemente pro Wellenlänge auf. Wie auch Platte und Gepäckraumboden wird das Wagenbodenblech mit einer Punktkraft von 1 N in z -Richtung angeregt.

Zur Charakterisierung des Modells sind in Abbildung 5.43 die Pegel der ERP und der Eingangsleistung (links) sowie das Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit \underline{v}_z (rechts) über der Anregungsmoden n dargestellt.

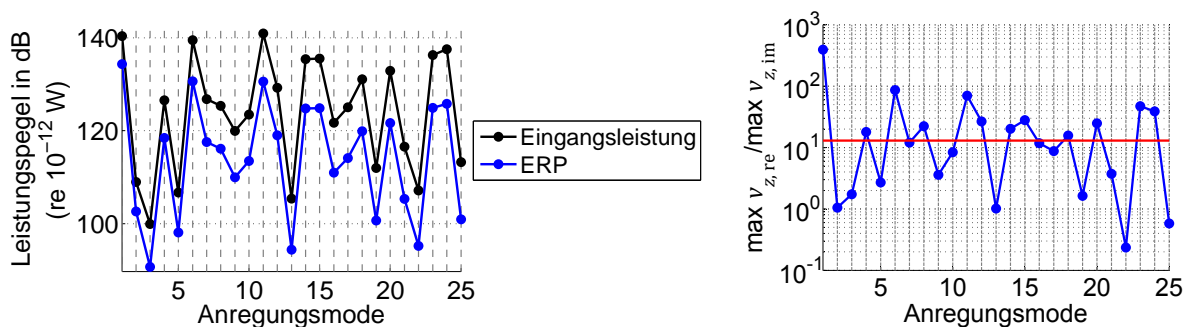


Abbildung 5.43: ERP- und Eingangsleistungspegel (links) sowie Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit \underline{v}_z (rechts) über der Anregungsmoden n für das Wagenbodenblech

Wie auch beim Gepäckraumboden liegt die ERP in allen Anregungsmoden unterhalb der Eingangsleistung. Da die Dämpfung gleich hoch gewählt ist, war dieses Verhalten zu erwarten. Sowohl bei der Platte als auch beim Gepäckraumboden ließen sich anhand des Verhältnisses des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit Tendenzen ableiten, in welchen Anregungsmoden kleinere Massen zu höheren Pegelreduktionen der ERP führen als größere, siehe Abbildung 5.30. Beim Gepäckraum-

boden resultierte die Auswertung des Zusammenhangs zwischen Höhe der Modifikationsmasse und zugehöriger Änderung der ERP-Pegel in einer Aufteilung der Anregungsmoden in zwei Hälften. In der Darstellung des Verhältnisses des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit in Abbildung 5.43 ist daher eine rote Linie eingezeichnet. Diese ist bewusst so positioniert, dass sie die 25 Punkte der Anregungsmoden auch in ungefähr zwei Hälften teilt – 12 Punkte liegen oberhalb und 13 Punkte liegen unterhalb. Basierend auf den Ergebnissen beim Gepäckraumboden wird vermutet, dass beim Wagenbodenblech in den Anregungsmoden, die oberhalb oder unterhalb der roten Linie liegen, höhere Pegelreduktionen tendenziell bei einer größeren bzw. einer kleineren Modifikationsmasse erzielt werden. Diese Vermutung ist im Folgenden zu überprüfen.

In Abbildung 5.44 sind exemplarisch die Ergebnisse der Wagenbodenblechmodelle $R_{\max, X \%, 1...25}$ (oben) und $R_{\min, X \%, 1...25}$ (unten) für eine konstante Masse von 0,1 kg (links) und 0,01 kg (rechts) zu sehen (Änderung des Stahl-Elastizitätsmoduls um den gleichen Faktor wie die Dichte). Beide Modifikationseinstellungen sind identisch zu denen beim Gepäckraumboden in Abbildung 5.40. In der Legende dieser und der folgenden Abbildungen wird WBB als Abkürzung für das Wagenbodenblech verwendet.

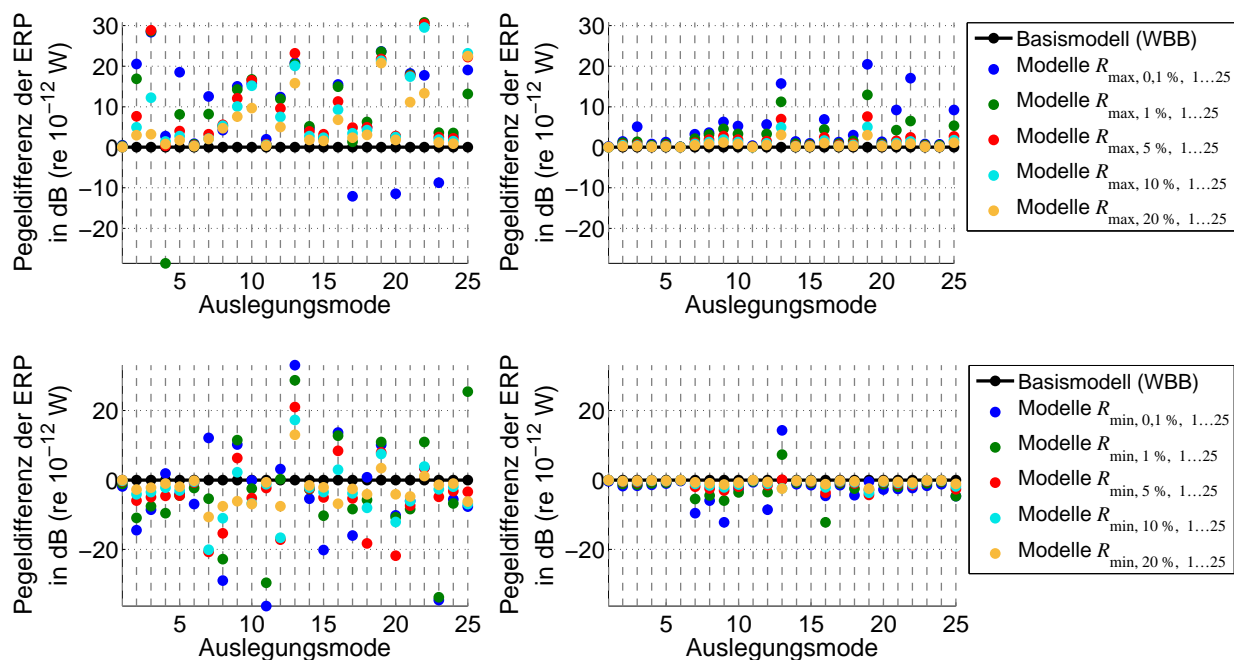


Abbildung 5.44: Pegeldifferenzen der ERP für die Wagenbodenblechmodelle $R_{\max, X \%, 1...25}$ (oben) und $R_{\min, X \%, 1...25}$ (unten) bzgl. des Basismodells für Massenerhöhungen um 0,1 kg (links) und um 0,01 kg (rechts) bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses

Zunächst kann festgestellt werden, dass die abgeleiteten Modifikationsregeln auch beim Wagenbodenblech anwendbar sind. Die große Mehrheit der Modelle $R_{\max, X \%, 1...25}$ führt zu Erhöhungen der ERP-Pegel und die große Mehrheit der Modelle $R_{\min, X \%, 1...25}$ führt zu Reduktionen der ERP-Pegel. Wie auch bei der Platte und beim Gepäckraumboden zeigt sich, dass die Anregungsmoden einen Einfluss darauf hat, welche Masse und welche Modifikationsfläche die größten Pegeländerungen bewirken. In Abbildung 5.45 ist erneut das Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit \underline{v}_z über der Anregungsmoden n zu sehen, wobei nun die Punkte der Anregungsmoden – analog zur Ergebnisauswertung in Abbildung 5.30 – eingefärbt sind.

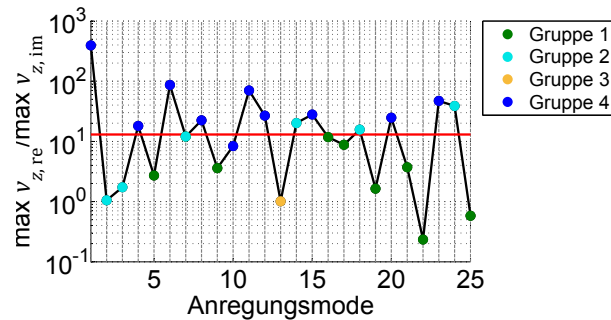


Abbildung 5.45: Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit \underline{v}_z (rechts) über der Anregungsmoden n für das Wagenbodenblech

In Anregungsmoden der Gruppe 1 (grün) werden mit einer kleineren Masse von 0,1 kg oder 0,01 kg höhere Reduktionen der ERP-Pegel erzielt als mit einer Masse von 1 kg. Die Punkte der Gruppe 2 (hellblau) markieren Anregungsmoden, in denen zumindest beim kleinsten Grenzwert von $X = 0,1 \%$ mit einer kleineren Masse höhere Pegelreduktionen verursacht werden. In Anregungsmoden in Gruppe 3 (gelb) – diese beinhaltet lediglich die Anregungsmoden 13 – kann mit keiner untersuchten Modifikationseinstellung eine nennenswerte Pegelreduktion erwirkt werden. Gruppe 4 (dunkelblau) umfasst alle Anregungsmoden, in denen die höchste Masse von 1 kg die größte Pegelreduktion bewirkt hat. Die Mehrheit der Punkte, die Gruppe 4 zugeordnet ist, liegt oberhalb der roten Linie. Umgekehrt liegen alle Punkte der Gruppe 1 unterhalb der roten Linie. Damit stellt sich die gleiche Verteilung wie beim Gepäckraumboden ein. Somit bestätigt sich auch die Vermutung, dass das Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit als ein erster Anhaltspunkt für die Wahl der Modifikationsmasse verwendet werden kann.

Zuletzt werden in Abbildung 5.46 auch beim Wagenbodenblech über alle untersuchten Modifikationseinstellungen hinweg die maximal erzielten Pegeldifferenzen pro Anregungsmoden für die drei Modifikationsfälle (Massen-, Steifigkeits- sowie Massen- und Steifigkeitseinfluss) zusammengefasst.

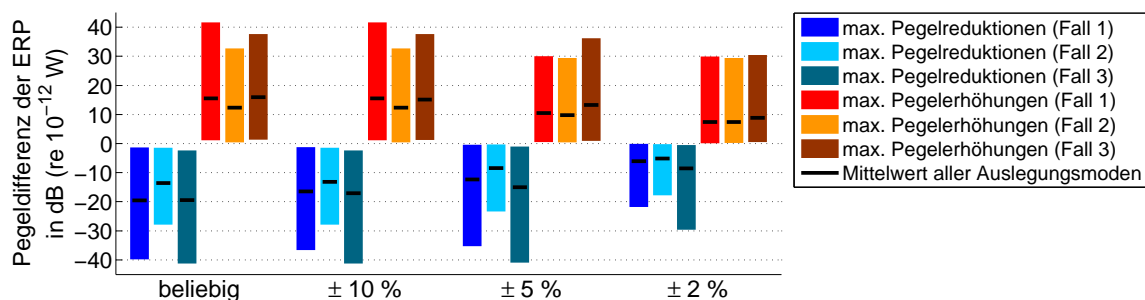


Abbildung 5.46: Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP beim Wagenbodenblech für alle Auslegungsmoden, alle Modifikationseinstellungen sowie alle drei Modifikationsfälle (Massen-, Steifigkeits- sowie Massen- und Steifigkeitseinfluss) bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen

Die Zusammenfassung liefert die endgültige Bestätigung, dass die Validierung der Modifikationsregeln erfolgreich ist. Kein Balken einer Pegelreduktion beginnt oberhalb einer Pegeldifferenz von 0 dB und umgekehrt beginnt kein Balken einer Pegelerhöhung unterhalb einer Pegeldifferenz von 0 dB. Weiterhin erstrecken sich die Balken alle bis zu sehr hohen negativen bzw. positiven Pegeldifferenzen. Alle Mittelwerte liegen unterhalb oder oberhalb von nennenswerten Pegeldifferenzen (≤ -3 dB

bzw. ≥ 3 dB). So werden bei einer maximal erlaubten Änderung der ersten 25 Eigenfrequenzen eines modifizierten Modells von 2 % für eine Massen-, eine Steifigkeits- sowie eine Massen- und Steifigkeits-erhöhung im Mittel noch Pegelreduktionen von 6,0 dB, 5,2 dB bzw. sogar 8,5 dB erreicht.

5.6.3 Experimentelle Validierung

Die experimentelle Validierung erfolgt am Plattenmodell aus Abschnitt 3.2.3. Im Rahmen der Validierung stehen flächige, quadratische Stahlausschnitte mit den Abmessungen $0,1\text{ m} \times 0,1\text{ m} \times 0,006\text{ m}$ und $0,05\text{ m} \times 0,05\text{ m} \times 0,006\text{ m}$ als Modifikationen zur Verfügung. Damit entsprechen sie einer prozentualen Fläche von ca. 1,85 % bzw. 0,46 % der Fläche der Platte. Die Modifikationen weisen eine Masse von je 0,47 kg bzw. 0,12 kg auf. Eine solche Modifikation bewirkt, wenn sie auf die Platte aufgeklebt wird, eine gleichzeitige Erhöhung von Masse und Steifigkeit. Daher ist im Experiment nur der gemeinsame Massen- und Steifigkeitseinfluss validierbar. Gemäß Gleichung (5.10) sind für die Platzierung einer solchen Modifikation die Schnittgrößen und die Schwinggeschwindigkeiten der Platte notwendig. Mit dem Scanning-Vibrometer können jedoch nur die Schwinggeschwindigkeiten erfasst werden¹¹. In den numerischen Untersuchungen hat sich allerdings gezeigt, dass beim Plattenmodell der Masseneinfluss, der nur über die Schwinggeschwindigkeiten beschrieben wird, den gemeinsamen Massen- und Steifigkeitseinfluss stark dominiert, siehe Abbildung 5.8. Unter der Annahme, dass dieses Verhalten auch für das experimentelle Plattenmodell gilt, sollte eine Platzierung der Modifikation gemäß Gleichung (5.3) für den reinen Masseneinfluss zu den nahezu gleichen Ergebnissen führen wie anhand der Gleichung (5.10).

Als Auslegungsmode für die Platzierung der Modifikation wird die Anregungsmode 13 gewählt, da sie im Vergleich zu den meisten anderen Anregungsmoden ein deutliches Minimum in der „Landkarte“ (standardisiertes Produkt aus Real- und Imaginärteil der gemessenen Schwinggeschwindigkeit) aufweist. Links in Abbildung 5.47 ist die „Landkarte“ der Anregungsmode 13 zu sehen. Das weiße Quadrat markiert die daraus bestimmte Position der Modifikation (Mittelpunkt und Umrandung).

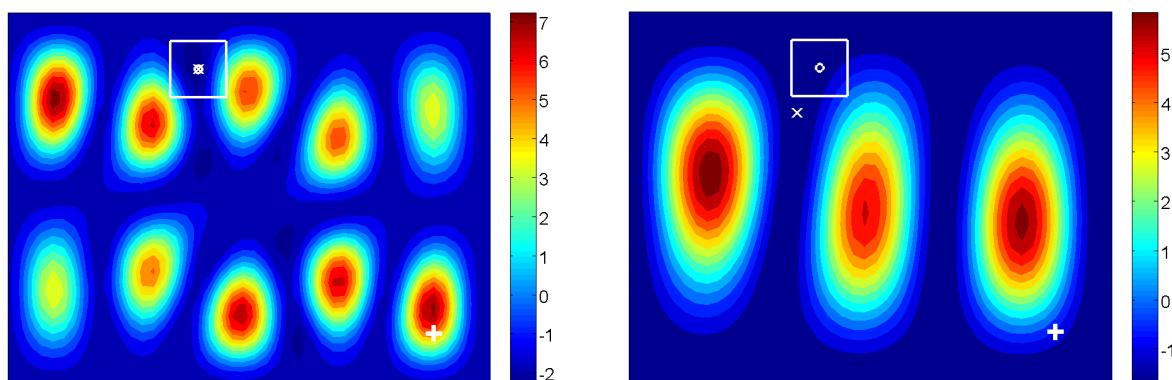


Abbildung 5.47: standardisiertes Produkt aus Real- und Imaginärteil der gemessenen Schwinggeschwindigkeit für die Anregungsmode 13 (links) und die Anregungsmode 4 (rechts) mit eingezeichneter Modifikationsposition (weißes Quadrat)

¹¹ Im Rahmen des durch die DFG geförderten Projekts „Entwicklung und Validierung eines allgemeingültigen Messverfahrens zur Bestimmung der Strukturintensität auf Basis der 3D-Laservibrometrie“ (Geschäftszeichen BO 3624/1-1) wird am Fachgebiet SAM ein Messverfahren zur Bestimmung der STI in dünnwandigen Strukturen entwickelt. Ein Schritt darin entspricht der Berechnung der Schnittgrößen aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten. Dementsprechend wird es zukünftig möglich sein, auch die Schnittgrößen basierend auf Vibrometermessungen zu bestimmen.

Im rechten Teil der Abbildung ist die entsprechende „Landkarte“ der Anregungsmode 4 zu sehen. Das weiße Kreuz links unterhalb der auch dort eingezeichneten Modifikation gibt das Minimum dieser „Landkarte“ an. Dieses Minimum liegt – im Gegensatz zu dem aller anderen Anregungsmoden – sehr nahe am Bereich der anhand Anregungsmode 13 positionierten Modifikation. Daher wird vermutet, dass die Modifikation auch in Anregungsmode 4 zu einer Reduktion der ERP führt. Auch dieser Umstand ist bei der Wahl der Anregungsmode 13 als Auslegungsmode berücksichtigt. Das weiße Plus (rechts unten) in beiden „Landkarten“ markiert die Position der Kraftanregung.

Wie in den numerischen Untersuchungen werden verschiedene Modifikationen untersucht, da vorher nicht bekannt ist, welche Masse am wirkungsvollsten ist. Dafür wird nach jeder Messung eine weitere Modifikation auf die vorherige geklebt. In einer ersten Messreihe werden insgesamt drei der größeren Modifikationen ($0,1\text{ m} \times 0,1\text{ m}$) verwendet. Abbildung 5.48 zeigt links die modifizierte Platte am Ende der Messreihe mit allen drei aufgeklebten Modifikationen.

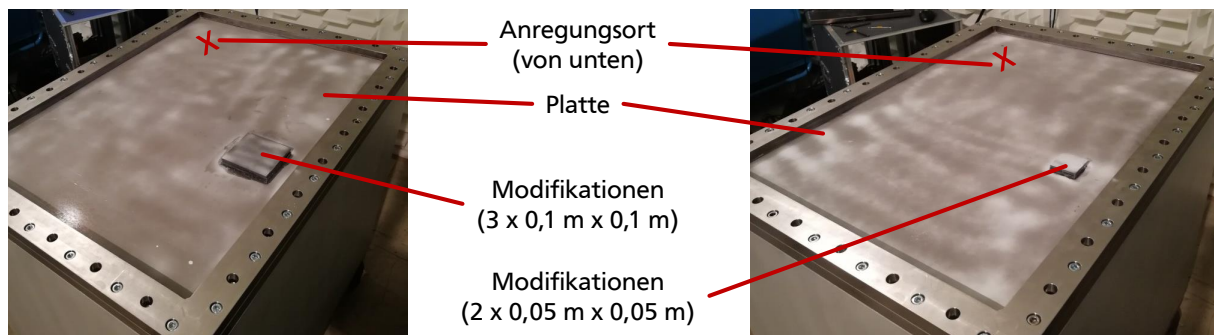


Abbildung 5.48: modifizierte Platte mit drei übereinander geklebten $0,1\text{ m} \times 0,1\text{ m}$ großen Modifikationen (links) und zwei übereinander geklebten $0,05\text{ m} \times 0,05\text{ m}$ großen Modifikationen (rechts)

Diese Art der Modifikationsvariation unterscheidet sich von den numerischen Variationen, da sich die Masse so über eine Dickenänderung der Gesamtmodifikation und nicht über eine Vergrößerung der Modifikationsfläche erhöht. Dieser Unterschied wird aus zwei Gründen bewusst akzeptiert. Der erste Grund betrifft die Tatsache, dass eine Modifikation, einmal auf der Platte angebracht, nicht mehr gelöst werden kann. Für eine neue, größere und zusammenhängende Modifikation müsste somit auch eine neue Platte in den Prüfstand eingebaut werden. Trotz größter Sorgfalt führt ein Neueinbau der Platte immer zu kleineren Änderungen im Strukturverhalten (verschobene Resonanzfrequenzen sowie Unterschiede in der Schwingform). Um Einflüsse solcher Änderungen in der Validierung auszuschließen, ist es sinnvoll, keinen Plattenwechsel vorzunehmen. Alternativ könnte die Modifikation aus vielen kleineren, nebeneinander platzierten Modifikationen zusammengesetzt werden, sodass die Gesamtmodifikation erweitert werden kann. Auch diese Variante bildet aber möglicherweise nicht das Verhalten der numerischen Modifikationen ab, da unklar ist, ob das Verhalten vieler kleiner verklebter Stahlausschnitte dem eines durchgängigen Stahlausschnitts gleicht. Der zweite Grund hängt mit der Form der Modifikation sowie ihrer Platzierung zusammen. Die Modifikationsform ist durch die quadratische Grundfläche vorgegeben und wird nicht anhand der „Landkarte“ abgeleitet. Basierend auf der „Landkarte“ wird nur der Mittelpunkt für die Positionierung der Modifikation bestimmt. In numerischen Voruntersuchungen hat sich allerdings gezeigt, dass Modifikationen mit fest vorgegebener quadratischer Fläche aufgebracht über dem Minimum der ERP-Skalarfelder ebenfalls zu Reduktionen der ERP führen.

Die gemessenen ERP-Pegel der Basisplatte sowie der drei modifizierten Platten über den 15 untersuchten Anregungsmoden¹² sind links in Abbildung 5.49 zu sehen. Rechts sind die resultierenden Pegeldifferenzen der modifizierten Strukturen in Bezug zur Basisplatte dargestellt. Analog zur Darstellung der numerischen Ergebnisse ist die Pegeldifferenz der Basisplatte mit sich selbst als visuelle Referenz in schwarz mit aufgetragen.

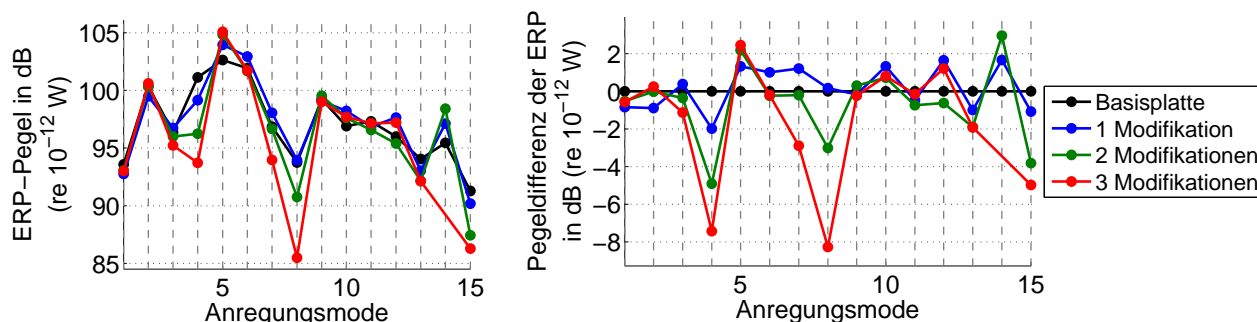


Abbildung 5.49: ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP der modifizierten Platten bzgl. des Basismodells bei Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl 0,1 m × 0,1 m großer Modifikationen

Sowohl in Anregungsmodus 4 als auch in Anregungsmodus 13 kommt es aufgrund der Modifikationen zu Reduktionen der ERP-Pegel. Die resultierenden Pegelreduktionen fallen allerdings deutlich unterschiedlich aus. In der Anregungsmodus 13 ist die maximal erzielte Reduktion mit 1,9 dB relativ klein. In Anregungsmodus 4 dagegen kann mit drei aufeinander platzierten Modifikationen sogar eine Reduktion des ERP-Pegels um 7,4 dB bewirkt werden. Die jeweiligen Resonanzfrequenzen der Anregungsmoden 4 und 13 erhöhen sich durch die drei Modifikationen nur um 2,6 % bzw. 1,5 %. Die Betrachtung der Pegeländerungen aller Anregungsmoden zeigt, dass die Modifikationen in Abhängigkeit von der Anregungsmodus sowohl zu Pegelerhöhungen als auch zu Pegelreduktionen führen können. Dementsprechend lässt sich festhalten, dass die Modifikationen nicht generell eine Reduktion der ERP verursachen, sondern die Position der Modifikation von Relevanz ist. Weiterhin fällt auf, dass auch in den Anregungsmoden 8 und 15 vergleichsweise hohe Pegelreduktionen auftreten. Diese können nicht dadurch erklärt werden, dass die Modifikation nahe dem absoluten Minimum der zugehörigen „Landkarten“ liegt. Allerdings hat sich auch in den numerischen Voruntersuchungen mit quadratischen Modifikationen gezeigt, dass die höchste Pegelreduktion nicht immer in der jeweiligen Auslegungsmodus erfolgt.

Ein weiterer Blick auf die Modifikationsposition in Abbildung 5.47 zeigt, dass die Modifikation in Anregungsmodus 13 so groß ist, dass sie sich an den Rändern auch über mittlere positive „Landkartenbereiche“ erstreckt. In Anregungsmodus 4 ist dies beispielsweise nicht der Fall. Dieser Unterschied kann ein Grund sein, weshalb die Modifikation in Anregungsmodus 13 eine geringere Pegelreduktion bewirkt als in Anregungsmodus 4. Nichtsdestotrotz kann die Validierung aufgrund der erzielten Pegelreduktionen in den Anregungsmoden 4 und 13 bei den gleichzeitigen Pegelerhöhungen in anderen Anregungsmoden als erfolgreich bewertet werden.

¹² Im Fall der Platte mit drei Modifikationen wird keine Messung für die Anregungsmodus 14 durchgeführt, da die zugehörige Anregungsfrequenz im Rahmen der Anregungsfrequenzdetektion durch die Chirp-Anregung nicht detektiert wird, da eine Knotenlinie der Betriebsschwingform nahe dem Anregungsort liegt. Frequenz und Betriebsschwingform der folgenden Resonanzfrequenz zeigen dagegen eindeutig, dass es sich dabei bereits um die Anregungsmodus 15 handelt.

Die Betrachtung des Verhältnisses des maximalen Real- und Imaginärteils der Schwinggeschwindigkeit der Basisplatte, siehe Abbildung 3.20, zeigt, dass das Minimum in Anregungsmoden 13 auftritt. Auf Basis der numerischen Erkenntnisse (in Anregungsmoden mit vergleichsweise kleinen Verhältniswerten bewirken kleinere Massen höhere Pegelreduktionen als größere Massen) liegt daher die Vermutung nahe, dass die verwendeten Modifikationen für eine große Pegelreduktion in der Anregungsmoden 13 eine zu hohe Masse (0,47 kg, 0,94 kg bzw. 1,41 kg) besitzen. Aus dem Grund wird eine weitere Messreihe mit den kleineren Modifikationen (0,05 m × 0,05 m, je 0,12 kg) durchgeführt, siehe Abbildung 5.48 rechts. Für diese Messreihe wird eine neue Platte in den Prüfstand eingebaut, sodass sich das Strukturverhalten leicht verändert. Bei der neu eingebauten Platte weist die Anregungsmoden 13 aber weiterhin den geringsten Verhältniswert von maximalem Real- und Imaginärteil der Schwinggeschwindigkeit auf. Durch den Plattenumbau verändert sich die „Landkarte“ wie erwartet ein wenig. In Abbildung 5.50 ist links die neue „Landkarte“ der Anregungsmoden 13 mit der eingezeichneten kleineren Modifikation zu sehen.

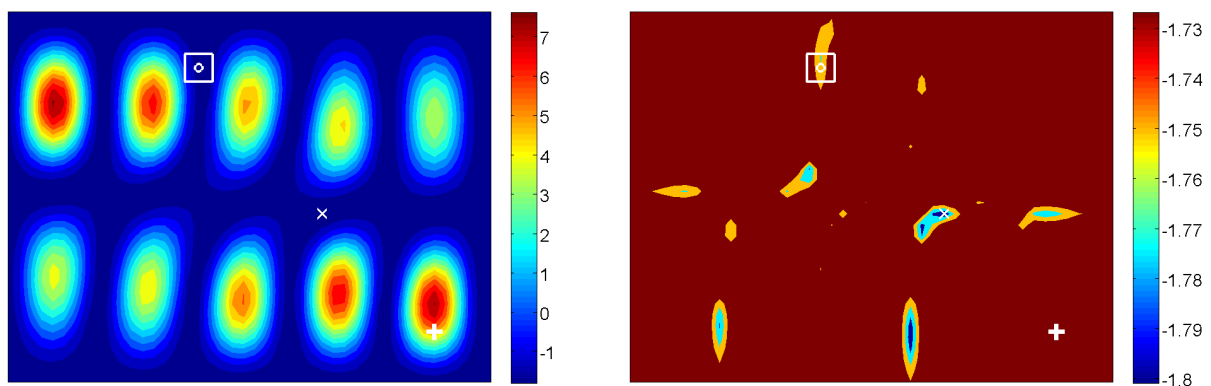


Abbildung 5.50: standardisiertes Produkt aus Real- und Imaginärteil der gemessenen Schwinggeschwindigkeit für die Anregungsmoden 13 nach Plattenumbau mit eingezeichneter Modifikationsposition; links: normal skaliert, rechts: Skalierung auf maximal $-1,72$ begrenzt

Wie anhand der Lage des kleinen weißen Kreuzes zu sehen ist, hat sich auch die Position des Minimums verändert. Diese Tatsache wirft die Frage auf, ob zur Überprüfung der Aussage, dass eine kleinere Masse in Anregungsmoden 13 sinnvoller ist, die Modifikation über dem neuen Minimum oder an der ursprünglichen Position platziert wird. Eine Analyse des Wertes der „Landkarte“ an der ursprünglichen Position des Minimums zeigt, dass dort weiterhin ein lokales Minimum sowie ein sehr kleiner „Landkartenwert“ auftritt. Dieser Umstand ist rechts in Abbildung 5.50 zusehen, wo die gleiche „Landkarte“ wie links gezeigt wird, nur die Skalierung auf maximal $-1,72$ begrenzt ist, um die Positionen der Minima hervorzuheben. Da die ursprüngliche Modifikationsposition weiterhin einem lokalen Minimum entspricht, wird entschieden, dass die ursprüngliche Modifikationsposition in der neuen Messreihe mit den kleineren Modifikationen beibehalten wird.

Die Ergebnisse der neuen Messreihe – ERP-Pegel und Pegeldifferenzen bzgl. der neuen Basisplatte – sind in Abbildung 5.51 zu sehen. Es zeigt sich, dass mit dem Aufbringen einer kleinen Modifikation eine Pegelreduktion in Anregungsmoden 13 von 4,2 dB im Vergleich zur neu eingebauten Basisplatte erzielt werden kann. Diese Pegelreduktion hat sich damit im Vergleich zur ersten Messreihe mit den größeren Modifikationen bereits mehr als verdoppelt. Wird eine zweite Modifikation aufgebracht, so kehrt sich der Effekt der Modifikationen bereits um und es wird keine Pegelredukti-

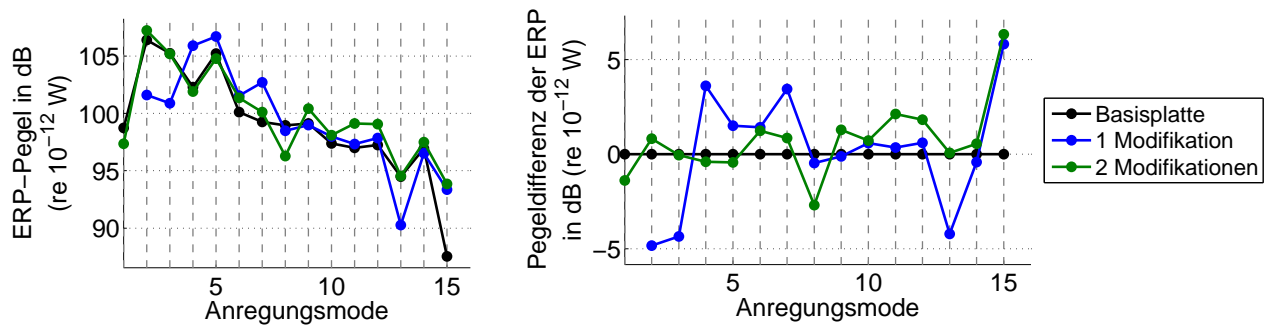


Abbildung 5.51: ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP der modifizierten Platten bzgl. des Basismodells bei Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl $0,05 \text{ m} \times 0,05 \text{ m}$ großer Modifikationen

on mehr bewirkt, sondern der ERP-Pegel gleicht in Anregungsmode 13 wieder dem der Basisplatte. Dieses Verhalten zeigt, dass die Masse von zwei der kleineren Modifikationen bereits wieder zu hoch ist, sodass eine dritte Modifikation nicht mehr untersucht wird. Dass die noch schwereren Modifikationen der ersten Messreihe dagegen größere Pegelreduktionen als die Varianten mit zwei kleinen Modifikationen erreichen, kann zunächst widersprüchlich wirken. Allerdings kann aufgrund der unterschiedlichen Modifikationsgröße, der unterschiedlichen Lage der „Landkartenminima“ und des daher leicht unterschiedlichen Strukturverhaltens der Platten kein linearer Zusammenhang zwischen Modifikationsmasse und Auswirkung auf die ERP beider Messreihen erwartet werden. Es ist stark davon auszugehen, dass nach dem Plattenumbau mit einer kleinen Modifikation am Ort des globalen Minimums der „Landkarte“, siehe kleines weißes Kreuz in Abbildung 5.50, eine noch höhere Pegelreduktion als 4,2 dB hätte erzielt werden können. Die Ergebnisse der zweiten Messreihe bestätigen nichtsdestotrotz die Vermutung, dass eine kleinere Masse in Anregungsmode 13 für größere Pegelreduktionen geeigneter ist. Es ist nicht auszuschließen, dass neben einer Platzierung im globalen Minimum auch eine noch kleinere Masse zu einer noch höheren Pegelreduktion führen würde. Eine solche Untersuchung wird im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht mehr durchgeführt. Die experimentelle Validierung liefert zudem die Bestätigung, dass das Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Schwinggeschwindigkeit ein Indikator für eine sinnvolle Massenwahl ist.

5.7 Diskussion der Ergebnisse

Abschließend sollen die Modifikationen und die resultierenden Änderungen im Modell greifbarer gemacht werden. Dafür werden für den Gepäckraumboden exemplarisch drei Betriebsschwingformen des Basismodells denen von modifizierten Strukturen, die eine deutliche ERP-Reduktion aufweisen, gegenübergestellt. An diesem Beispiel können die Auswirkungen der Modifikationen auf die jeweilige Betriebsschwingform sowie die Lage der Modifikationen bzgl. der Schwingform diskutiert werden. Diese Gegenüberstellung ist in Abbildung 5.52 zu sehen – links die Schwingformen des Basismodells und rechts der modifizierten Modelle $R_{\min, 1\%, 9}$ (oben), $R_{\min, 1\%, 17}$ (mittig) und $R_{\min, 1\%, 20}$ (unten) bei Untersuchung des gemeinsamen Massen- und Steifigkeitseinflusses (konstante Masse von $0,01 \text{ kg}$ und gleichzeitige Änderung des Elastizitätsmoduls um den gleichen Faktor wie die Dichte). In pink sind in den drei rechten Abbildungen zudem die Modifikationen, die sich jeweils aus mehreren Teilstücken zusammensetzen, eingezeichnet. Alle sechs Betriebsschwingformen – gezeigt ist jeweils der Betrag (Betragsrichtung und komplexer Betrag) $V_{\text{abs, mag}}$ – sind auf ihre eigenen Minima und Maxima skaliert, um die Unterschiede in allen Schwingformen sichtbar zu machen. In den drei gezeigten Beispielen

führen die Modifikationen in ihrer Auslegungsmode zu Pegelreduktionen von 9,7 dB, 16,7 dB bzw. 16,6 dB. Die Eigenfrequenzen der jeweiligen Anregungsmoden ändern sich dagegen nur um +0,6 %, −0,3 % bzw. +0,2 %.

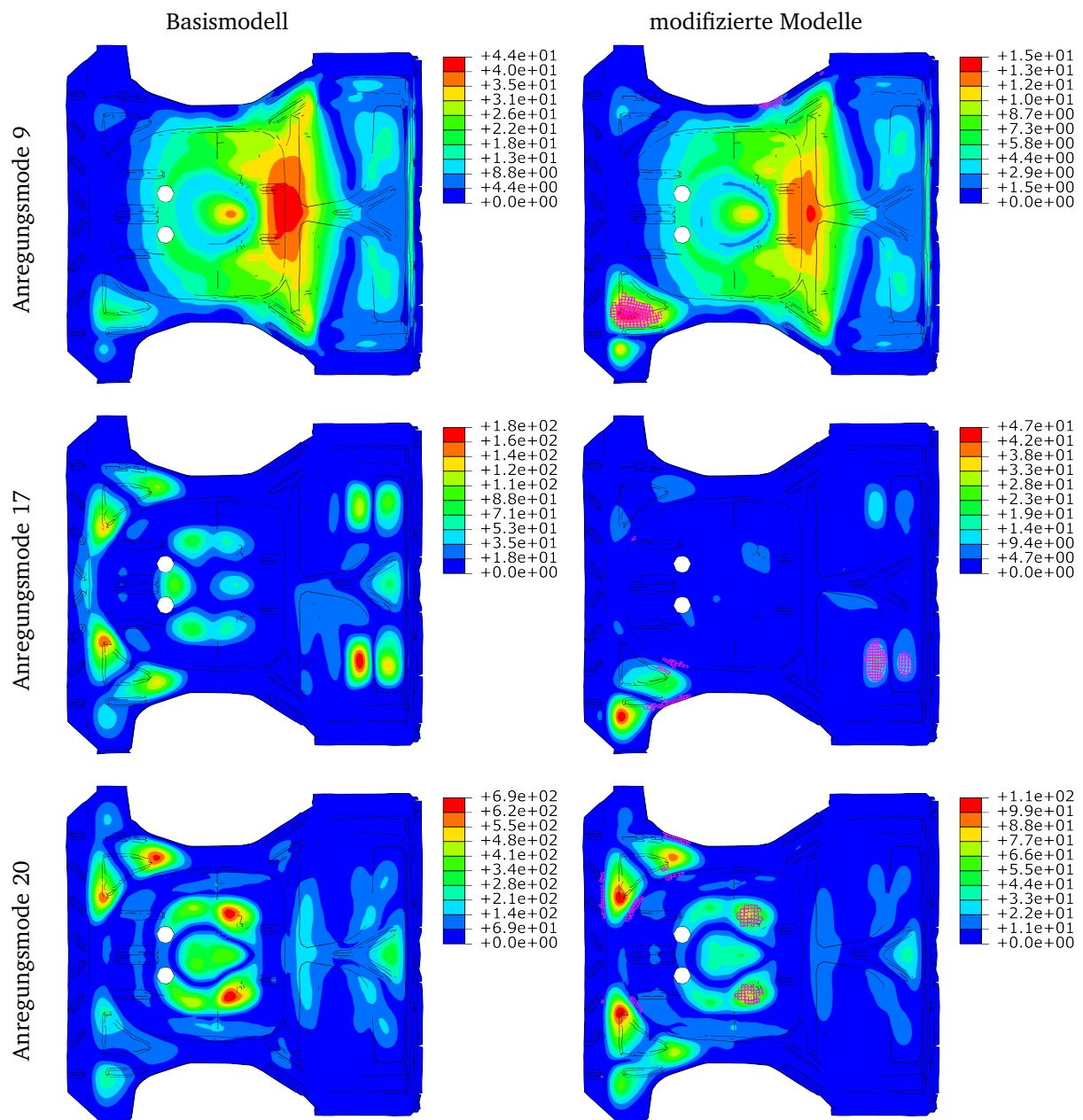


Abbildung 5.52: Vergleich des Betrags der Betriebsschwingformen $V_{abs,mag}$ zwischen dem Basismodell (links) und drei modifizierten Gepäckraumbodenmodellen (rechts); oben: Modell $R_{min, 1\%, 9}$, mittig: Modell $R_{min, 1\%, 17}$, unten: Modell $R_{min, 1\%, 20}$


Wie es anhand der Reduktionen der ERP-Pegel zu erwarten war, sinken in allen drei Anregungsmoden die maximalen Beträge der Betriebsschwingformen – in den Anregungsmoden 9, 17 und 20 jeweils um die Faktoren 2,9, 3,8 bzw. 6,3. Ein Vergleich der Betriebsschwingformen zwischen dem Basismodell und den modifizierten Modellen zeigt, dass sich die Modifikationen abgesehen von der Größenordnung unterschiedlich auf die Betriebsschwingformen auswirken. In Anregungsmodus 9 wird nur eine sehr geringe Änderung der Schwingform verursacht. In Anregungsmodus 17 dagegen bewirkt

die Modifikation, dass eine völlig andere Schwingform auftritt, die nur in kleineren Bereichen Gemeinsamkeiten zu der des Basismodells aufweist. Anregungsmoden 20 ist ein Beispiel, in dem sowohl größere Ähnlichkeiten zwischen den Schwingformen als auch kleinere Unterschiede vorkommen.

Die Auswertung der Modifikationspositionen lässt keinen direkten Zusammenhang zur Betriebschwingform erkennen. Da in die Approximationslösung des gemeinsamen Massen- und Steifigkeitseinflusses neben der Schwinggeschwindigkeit auch die Schnittgrößen eingehen, siehe Gleichung (5.10), ist dies nicht verwunderlich. In den beiden Anregungsmoden 17 und 20 liegen Teile der Modifikationen in Bereichen hoher Schwinggeschwindigkeiten, allerdings sind dies nicht unbedingt die Bereiche der größten Amplituden und andere Teile der Modifikationen liegen sogar in Bereichen mit sehr geringen Schwinggeschwindigkeiten. Alle drei Modifikationen verteilen sich auf Strukturbereiche, die vermutlich durch eine anwenderbasierte Auswertung dieser drei Betriebsschwingformen nicht in der Form für schallmindernde Strukturänderungen gewählt worden wären.

An allen drei untersuchten Strukturen (Platte, Gepäckraumboden und Wagenbodenblech) kann die ERP basierend auf den Approximationslösungen durch Massen- und/oder Steifigkeitserhöhungen gezielt reduziert oder erhöht werden. Die aus den Approximationslösungen abgeleiteten Modifikationsregeln zeigen dem Anwender, wie es auch das Ziel war, wo die Modifikationen zu platzieren sind. Da gute Modifikationseinstellungen allerdings bisher nicht exakt vorhergesagt werden können, wird bei der Anwendung der Modifikationsregeln weiterhin mehr als eine Simulation notwendig sein, außer der Anwender trifft direkt eine Modifikationswahl, die zu einem für ihn zufriedenstellenden Ergebnis führt. Dennoch ist es mit Hilfe der aufgestellten Modifikationsregeln möglich, mittels weniger Simulationen zu einer nennenswerten Reduktion der ERP größer 3 dB in einer anvisierten Anregungsfrequenz zu gelangen. Damit sind deutlich weniger Simulationsdurchläufe notwendig als bei einer Optimierung. Theoretisch können die optimalen Modifikationseinstellungen auch über eine Optimierung ermittelt werden, sodass sich die Untersuchung auf viele Simulationen erweitert, dafür aber nicht nur eine sehr gute, sondern eine optimale ERP-Reduktion erreicht wird. Umgekehrt ist es nicht sinnvoll, ein herkömmliches Optimierungsverfahren nach wenigen Simulationen abzubrechen, da dann in der Regel keine bereits zufriedenstellende Lösung vorliegt. Der Unterschied liegt im Startpunkt: Durch die Modifikationsregeln werden bereits Modifikationspositionen vorgegeben, die auf jeden Fall zu einer Pegelreduktion führen. Zu Beginn einer üblichen Optimierung wird der Startpunkt meist zufällig oder in der Mitte des Designraums gewählt und die Position(en) der Modifikation(en) ist meist eine der wesentlichen Designvariablen.

Beim Gepäckraumboden und beim Wagenbodenblech konnte in jeweils einer Anregungsmoden (12 bzw. 13) mit keiner der untersuchten Modifikationseinstellungen eine nennenswerte ERP-Reduktion erzielt werden. Hierbei ist es nicht ausgeschlossen, dass andere, nicht untersuchte Einstellungen zielführend sind. Unabhängig davon sind beides Anregungsmoden, in denen die ERP im Ausgangszustand bereits ausgesprochen niedrig ist. Bei der Platte können in den ersten beiden Anregungsmoden die geringsten ERP-Reduktionen bewirkt werden. Gemäß dem Verlauf der ERP-Pegel, siehe Abbildung 3.5, sind dies allerdings die beiden Anregungsmoden mit der höchsten ERP. Eine gedankliche Korrektur der ERP-Pegel mit dem Abstrahlgrad einer Platte (Abbildung 2.3) zeigt, dass in den beiden ersten Anregungsmoden dagegen die tatsächlich abgestrahlte Schallleistung im Vergleich zu den weiteren Anregungsmoden nicht mehr am höchsten sein wird, sondern ebenfalls klein. Damit kann geschluss-



folgt werden, dass die Modifikationsregeln dann an ihre Grenzen stoßen können, wenn Strukturen bereits sehr „leise“ sind. Dafür sind die Modifikationsregeln in Frequenzen hilfreich, in denen es vergleichsweise „laut“ ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung von Modifikationsregeln zur Reduktion der Schallabstrahlung dünnwandiger Strukturen, die im Entwicklungsprozess Anwendung finden sollen, um dort auftretenden Akustikproblemen in Form einer zu hohen Schallabstrahlung noch entgegenzuwirken. Die Modifikationsregeln sollen – ohne Expertenwissen zu erfordern – aufzeigen, wo auf einer Struktur „kleine“ Massen- und/oder Steifigkeitserhöhungen die Schallabstrahlung deutlich reduzieren können.

Basierend auf dem Stand der Forschung werden zwei Ansätze zur Entwicklung der Modifikationsregeln herausgearbeitet. Der erste Ansatz basiert auf der STI-Analyse und der zweite auf einer systematischen Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Modifikationsorten und der resultierenden Schallabstrahlung, da hierzu keine Untersuchungen in der Literatur gefunden werden konnten. Im Stand der Forschung wird auch aufgezeigt, dass die ERP eine häufig verwendete Größe ist, um Änderungen der tatsächlich abgestrahlten Schallleistung aufgrund von Modifikationen basierend auf reinen Strukturanalysen abzuschätzen. Allerdings wird in keiner der vorgestellten Arbeiten die Eignung der ERP für eine solche Abschätzung überprüft. Am Beispiel einer Platte, modifiziert durch unterschiedliche Rippen, werden ERP und Schallleistung in dieser Arbeit bei einer harmonischen Anregung in den jeweils ersten 25 Eigenfrequenzen gegenübergestellt. Es wird gezeigt, dass die ERP im Falle solcher lokal begrenzten Modifikationen verwendet werden kann, um eine qualitative Aussage darüber zu treffen, ob die Schallleistung einer Struktur durch eine Modifikation sinkt oder steigt. Somit ist die ERP für die Bewertung von Modifikationen, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden sollen, geeignet und wird daher verwendet.

Zu Beginn der Untersuchungen zur Entwicklung von Modifikationsregeln anhand der STI werden skalare Kenngrößen aus den STI-Vektorfeldern abgeleitet. Es wird gezeigt, dass solche Kenngrößen hilfreich sind, um die Informationsdichte der Vektorfelder zu reduzieren und diese miteinander vergleichbar zu machen. Weiterhin sind skalare Kenngrößen notwendig, um Zusammenhänge in Form von Korrelationen zwischen STI und ERP zu bestimmen, da auch die ERP eine skalare Größe ist. Für diese Untersuchungen werden alle definierten skalaren Kenngrößen und die ERP für die Gruppe von Plattenmodellen mit Rippe aus der Voruntersuchung (Eignung der ERP als Bewertungsgröße von Modifikationen) berechnet. Es wird gezeigt, dass zwischen einigen aufgestellten STI-basierten Kenngrößen und der ERP hohe Korrelationen bestehen.

So kann anhand der Korrelationen gezeigt werden, dass Strukturen umso lauter sind, je höher die maximal auftretende Flussdichte der STI in der Struktur ist und insbesondere je höher die Flussdichte im Bereich der Krafteinleitung ist. Weiterhin ist in lauten Strukturen auch der quantitative Unterschied zwischen der Flussdichte am Anregungsort und der im Mittel vorliegenden Flussdichte größer als in leiseren Strukturen. Auch bei einer alleinigen Betrachtung der Flussdichtemittelwerte zeigt sich, wenn auch weniger ausgeprägt, dass mit einem Anstieg dieser Werte auch die ERP ansteigt. Werden die STI-Vektorfelder dagegen rein qualitativ betrachtet (auf Eins normierte STI-Vektorfelder), so kehrt sich das Verhalten um. Dann sind Modelle umso lauter, je kleiner der Mittelwert der Flussdichte ist. Anschaulich bedeutet dies, dass die Bereiche hoher Flussdichten bei lauten Strukturen klein im Verhältnis zu den Bereichen kleinerer Flussdichten sind. Andere untersuchte Kenngrößen, wie beispielsweise die Anzahl der Wirbel im STI-Verlauf, weisen dagegen keine Korrelation zur ERP auf.

Diese Zusammenhänge werden erst an der Platte detailliert untersucht und anschließend am Beispiel von zwei Kenngrößen am Gepäckraumboden bestätigt.

Aufgrund der hohen Korrelation zwischen maximaler Flussdichte und ERP – in Kombination mit der Tatsache, dass in der Literatur Arbeiten beschrieben sind, in denen Modifikationen auf ausgeprägten Energiepfaden an Stellen hoher Flussdichten zu Schwingungsminderungen führen – wird die Hypothese aufgestellt, dass die Höhe der Flussdichte als Kriterium zur Platzierung von schallabstrahlungsmindernden Modifikationen geeignet ist. Zur Überprüfung der Hypothese werden verschiedene flächige Modifikationen, die sich in ihrer Ausdehnung, ihrer Dicke und ihren Materialparametern unterscheiden, an den Stellen der höchsten Flussdichtewerte platziert. Da für jede Anregungsfrequenz eine eigene Flussdichte-Verteilung vorliegt, wird für jede Anregungsfrequenz auch eine eigene modifizierte Struktur erstellt. Die Auswirkung der Modifikationen wird immer monofrequent betrachtet und bewertet. Die Anregungsfrequenzen entsprechen immer den Eigenfrequenzen der jeweiligen Strukturen, sodass Modelle immer bei Anregung in der gleichen Anregungsmoden verglichen werden, wobei sich „gleich“ auf die Reihenfolge des Auftretens der Anregungsfrequenzen bezieht. Ein Vergleich der ERP der modifizierten Strukturen mit der zugehörigen ERP des unmodifizierten Basismodells führt allerdings zu dem Ergebnis, dass die Hypothese verworfen werden muss, da die Modifikationen nicht in allen Anregungsmoden zu Reduktionen der ERP führen. Die Flussdichte der STI kann folglich nicht als alleiniges Kriterium verwendet werden, um Positionen auf einer Struktur zu lokalisieren, an denen Modifikationen zu einer Reduktion der Schallabstrahlung führen. Weitere Untersuchungen zur Platzierung von Modifikationen basierend auf der STI werden in dieser Arbeit nicht untersucht.

Im zweiten vorgestellten Ansatz zur Entwicklung der Modifikationsregeln werden die beiden Basismodelle, Platte und Gepäckraumboden, systematisch modifiziert, indem nacheinander auf jedem Element des FE-Netzes eine Modifikation aufgebracht und die resultierende ERP in mehreren Anregungsfrequenzen bestimmt wird. Für jede Anregungsfrequenz werden anschließend die ERP-Werte aller modifizierten Strukturen in den sogenannten ERP-Skalarfeldern zusammengefasst. Die ERP-Skalarfelder visualisieren für jede untersuchte Anregungsfrequenz über der jeweiligen Struktur, an welcher Stelle eine Modifikation zu welcher Änderung der ERP im Vergleich zum Basismodell führt. In einem nächsten Schritt werden basierend auf diesen Skalarfeldern – analog zur Platzierung von Modifikationen anhand der Flussdichte der STI im ersten Ansatz – Modifikationen in den Minima oder Maxima positioniert. Ziel ist es zu überprüfen, ob der durch die ERP-Skalarfelder visualisierte Zusammenhang zwischen Modifikationsort und ERP-Änderung auch für größerflächige Strukturänderungen gültig ist, da diese aufgrund einer höheren Masse und/oder Steifigkeit potenziell auch größere ERP-Änderungen hervorrufen können. Wie im ersten Ansatz der STI-Analyse werden auch dieses Mal in jeder Anregungsfrequenz verschiedene Modifikationen, die sich in Ausdehnung, Dicke und Materialparametern unterscheiden, untersucht. Sowohl bei der Erstellung der ERP-Skalarfelder als auch bei der Platzierung der Modifikationen werden der Massen- und Steifigkeitseinfluss zum einen separat und zum anderen gemeinsam untersucht, indem die Modifikationen in beiden Fällen bei der Definition der Materialparameter nur eine Dichte oder nur einen Elastizitätsmodul oder beides zugewiesen bekommen.

Es wird gezeigt, dass sowohl bei der Platte als auch beim Gepäckraumboden die Mehrheit der Modelle, in denen Modifikationen anhand der Maxima oder Minima der ERP-Skalarfelder platziert werden,

zu Erhöhungen bzw. Reduktionen der ERP führt. Dies gilt sowohl für die Untersuchungen des reinen Massen- und Steifigkeitseinflusses als auch des gemeinsamen Einflusses. Welche Modifikation dabei die höchsten gezielten Erhöhungen oder Reduktionen bewirkt, hängt sowohl vom Modell als auch von der Anregungsmoden ab. Bei der Platte, die zwar kleiner, dafür aber dicker und damit schwerer als der Gepäckraumboden ist, erzielen beispielsweise höhere Massen und dickere Modifikationen größere ERP-Änderungen als leichtere und dünnere Modifikationen. Beim Gepäckraumboden zeigen dagegen die leichteren und dünneren untersuchten Modifikationen meist eine größere Wirkung. Bei beiden Modellen zeigt sich, dass in allen untersuchten Anregungsmoden – mit Ausnahme einer Anregungsmoden beim Gepäckraumboden – mit mindestens einer der untersuchten Modifikationseinstellungen eine nennenswerte ERP-Reduktion von mindestens 3 dB erzielt werden kann. In den meisten Fällen sind die ERP-Reduktionen aber weitaus größer. Eine klare Regel, anhand derer vorab die beste Wahl für die Masse, Steifigkeit oder Größe der Modifikation getroffen werden kann, wird nicht gefunden. Allerdings kann anhand des Verhältnisses zwischen Real- und Imaginärteil der Schwinggeschwindigkeit des Basismodells die Wirkung der Masse grob abgeschätzt werden. Tendenziell bewirkt eine große oder kleinere Masse eine höhere Pegel-Reduktion, wenn das Verhältnis hoch bzw. klein ist – im Vergleich zu den Werten der benachbarten Anregungsfrequenzen.

Neben den erzielten ERP-Änderungen werden auch die Änderungen der Eigenfrequenzen aufgrund der Modifikationen betrachtet. Hierbei werden bei jedem Modell die Änderungen der ersten 25 Eigenfrequenzen betrachtet und nicht nur derjenigen Eigenfrequenz, die als Anregungsfrequenz und damit als Auslegungsmode verwendet wird. Werden nur diejenigen Modifikationen ausgewertet, die zu Eigenfrequenzänderungen von maximal $\pm 2\%$ führen, können beispielsweise bei einer gleichzeitigen Erhöhung von Masse und Steifigkeit im Mittel über alle Anregungsmoden maximale Pegelreduktionen der ERP von 14,3 dB bei der Platte und 9,9 dB beim Gepäckraumboden erzielt werden. Damit ist der Nutzen der ERP-Skalarfelder als gültige „Landkarte“ zur gezielten Platzierung schallmindernder (oder auch schallerhöhender) Modifikationen aufgezeigt.

Der wichtigste Schritt zur Entwicklung der Modifikationsregeln ist die Approximation der ERP-Skalarfelder durch die Strukturgrößen der Basismodelle. Die Strukturgrößen einer Struktur liegen bereits nach einer Berechnung vor. Für die Erstellung der ERP-Skalarfelder werden dagegen sehr viele Berechnungen benötigt, da sie sich aus den Ergebnissen zahlreicher modifizierter Modelle zusammensetzen. Es wird gezeigt, dass sich die ERP-Skalarfelder aller drei Modifikationsfälle – reiner Massen-, reiner Steifigkeits- sowie gemeinsamer Massen- und Steifigkeitseinfluss – durch Strukturgrößen der Basismodelle approximieren lassen. Hierfür werden multiple lineare Regressionen durchgeführt und ausgewertet. Die drei daraus abgeleiteten Approximationslösungen weisen allesamt ausschließlich Produkte aus Real- und Imaginärteil der gleichen Strukturgrößen auf. Der Masseneinfluss kann alleinig durch das Produkt aus Real- und Imaginärteil der Schwinggeschwindigkeit in Normalenrichtung zur Struktur beschrieben werden. Der Steifigkeitseinfluss entspricht einer Superposition von Produkten aus Real- und Imaginärteil verschiedener Schnittgrößen. Die ERP-Skalarfelder des gemeinsamen Einflusses von Masse und Steifigkeit sind nahezu identisch mit der Superposition beider, sodass auch die Approximation der Superposition der Einzellösungen entspricht.

In einem letzten Schritt werden die Approximationslösungen und die darauf basierenden aufgestellten Modifikationsregeln – Platzierung von Modifikationen in den Minima oder Maxima der Skalar-

felder der Approximationslösungen für eine gezielte Reduktion bzw. Erhöhung der ERP – validiert. Es wird zum einen gezeigt, dass basierend auf den Approximationslösungen sowohl bei der Platte als auch beim Gepäckraumboden sehr ähnliche ERP-Änderungen wie direkt basierend auf den ERP-Skalarfeldern bewirkt werden. Zum anderen werden die Modifikationsregeln an einer dritten, unabhängigen Struktur, einem Wagenbodenblech, angewendet und erfolgreich validiert. Auch die experimentelle Validierung – Anwendung der Modifikationsregel zur Platzierung von Massen – verläuft erfolgreich und die ERP kann gezielt um bis zu 7,4 dB gesenkt werden. Erstmals ist es nun möglich, basierend auf den aufgestellten Modifikationsregeln, die Schallabstrahlung dünnwandiger Strukturen durch kleine Massen- und/oder Steifigkeitserhöhungen gezielt zu reduzieren oder, wenn gewünscht, auch zu erhöhen. Neben dem ursprünglichen Ziel der Anwendung im Entwicklungsprozess ist auch eine Korrektur bereits hergestellter Produkte denkbar.

Um den Anwendungsbereich der bereits aufgestellten Modifikationsregeln zu erweitern, sollte untersucht werden, wie die beschriebene Methode auf eine multifrequente Schallminderung übertragen werden kann. Ein erster Ansatz hierzu ist es, die Aussagekraft von superponierten ERP-Skalarfeldern mehrerer Frequenzen als „Landkarten“ für Modifikationen zu analysieren. Ebenso können und sollten die Modifikationsregeln durch weitere Untersuchungen zur Vorhersage der zu wählenden Modifikationseinstellungen (Ausdehnung, Dicke oder Materialparameter) verbessert werden.

Die vorgestellte Methode, mittels derer die Modifikationsregeln entwickelt werden, eignet sich zudem zur Entwicklung weiterer Modifikationsregeln. So könnten beispielsweise auf die gleiche systematische Art die Einflüsse einer Reduktion von Masse und/oder Steifigkeit bis hin zum Einbringen von Löchern untersucht werden. Ebenfalls interessant ist es, andere Formen systematischer Strukturmodifikationen zu untersuchen, wie z. B. elementgroße Rippen, die eine andere Art der Steifigkeitsänderung verursachen als die in dieser Arbeit verwendeten flächigen Modifikationen. Weiterhin sollte untersucht werden, inwieweit in einer iterativen Anwendung der Modifikationsregeln mit jeweils anteiligen Massen- und/oder Steifigkeitserhöhungen höhere ERP-Reduktionen erzielt werden können als wenn die gesamte Masse und/oder Steifigkeit in einem Schritt erhöht wird. Hierbei ist es auch denkbar, abwechselnd Masse hinzuzufügen und zu entfernen, um darüber auch neue Designlösungen bei konstanter Masse zu erhalten oder iterativ in mehreren Schritten Material zu reduzieren, um neue, leisere Designlösungen bei gleichzeitig reduzierter Masse zu finden.

Abschließend sollte auch die STI-Analyse zur Platzierung von Modifikationen weiter untersucht werden. In folgenden Ansätzen ist es allerdings sinnvoll, die Flussrichtung genauso stark zu berücksichtigen wie die Flussdichte. Eine detaillierte Analyse zwischen Modifikationspositionen und resultierenden STI-Verläufen sowie Unterschieden im Vergleich zum Basismodell derjenigen Modelle, die in dieser Arbeit zu sehr hohen ERP-Reduktionen oder -Erhöhungen führen, können möglicherweise Anhaltspunkte für neue STI-basierte Methoden der Schallminderung liefern. Die Korrelationsuntersuchungen zwischen der ERP und den STI-basierten skalaren Kenngrößen zeigen, dass es das Ziel erfolgreicher Schallreduktionen sein sollte, die Flussdichte in einer Struktur möglichst homogen zu verteilen. Bisher offen und daher noch zu untersuchen ist, wie dieses Ziel erreicht werden kann.

A Anhang

A.1 Ergänzungen zum Basismodell der Platte

Tabelle A.1: Eigenfrequenzen (EF) der Platte

EF-Nr.	Frequenz in Hz	EF-Nr.	Frequenz in Hz	EF-Nr.	Frequenz in Hz	EF-Nr.	Frequenz in Hz
1	47,1	8	298,2	15	535,2	22	802,7
2	94,8	9	345,4	16	565,5	23	814,2
3	141,2	10	379,1	17	605,7	24	849,6
4	174,3	11	424,3	18	644,1	25	853,3
5	188,6	12	429,6	19	678,1		
6	267,8	13	518,5	20	698,3		
7	285,9	14	522,6	21	754,5		

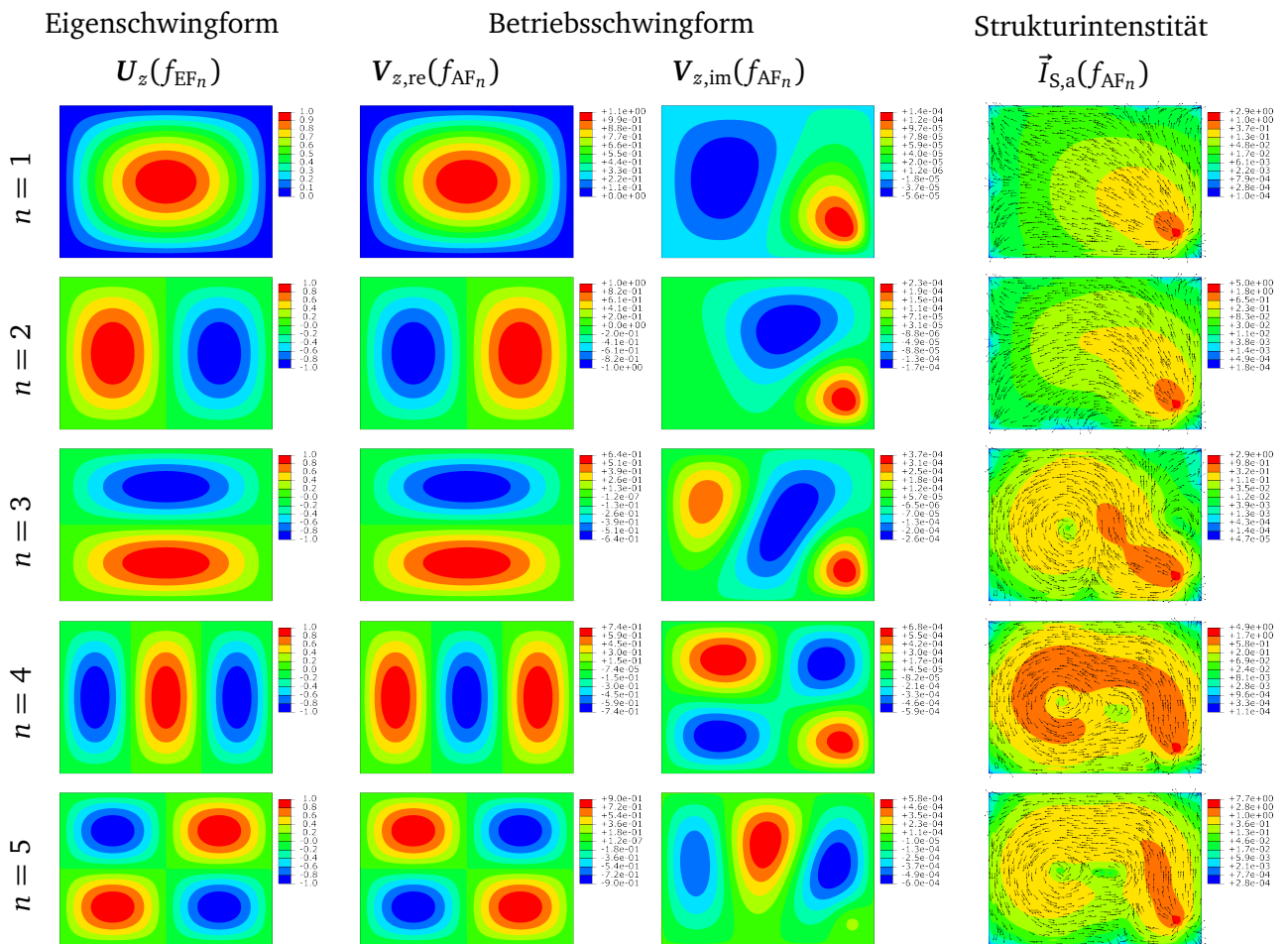


Abbildung A.1: Eigenschwingformen $U_z(f_{EF_n})$, Betriebsschwingformen ($V_{z, \text{re}}(f_{AF_n})$, $V_{z, \text{im}}(f_{AF_n})$) und Strukturintensität $\vec{I}_{S,a}(f_{AF_n})$ der Platte für $n \in [1 \ 5]$

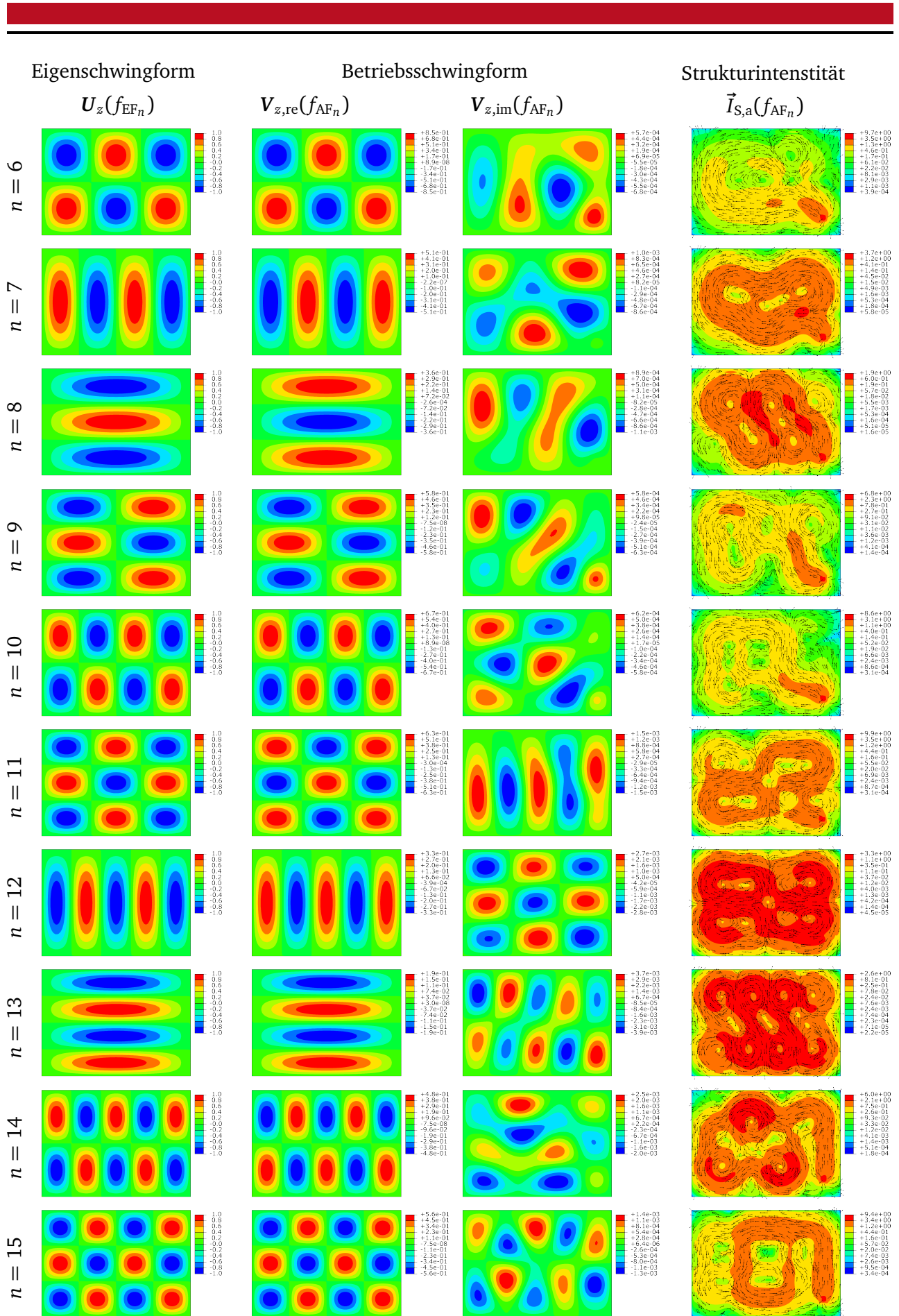


Abbildung A.2: Eigenschwingformen $U_z(f_{EF_n})$, Betriebsschwingformen ($V_{z,re}(f_{AF_n})$, $V_{z,im}(f_{AF_n})$) und Strukturintensität $\tilde{I}_{S,a}(f_{AF_n})$ der Platte für $n \in [6 \ 15]$

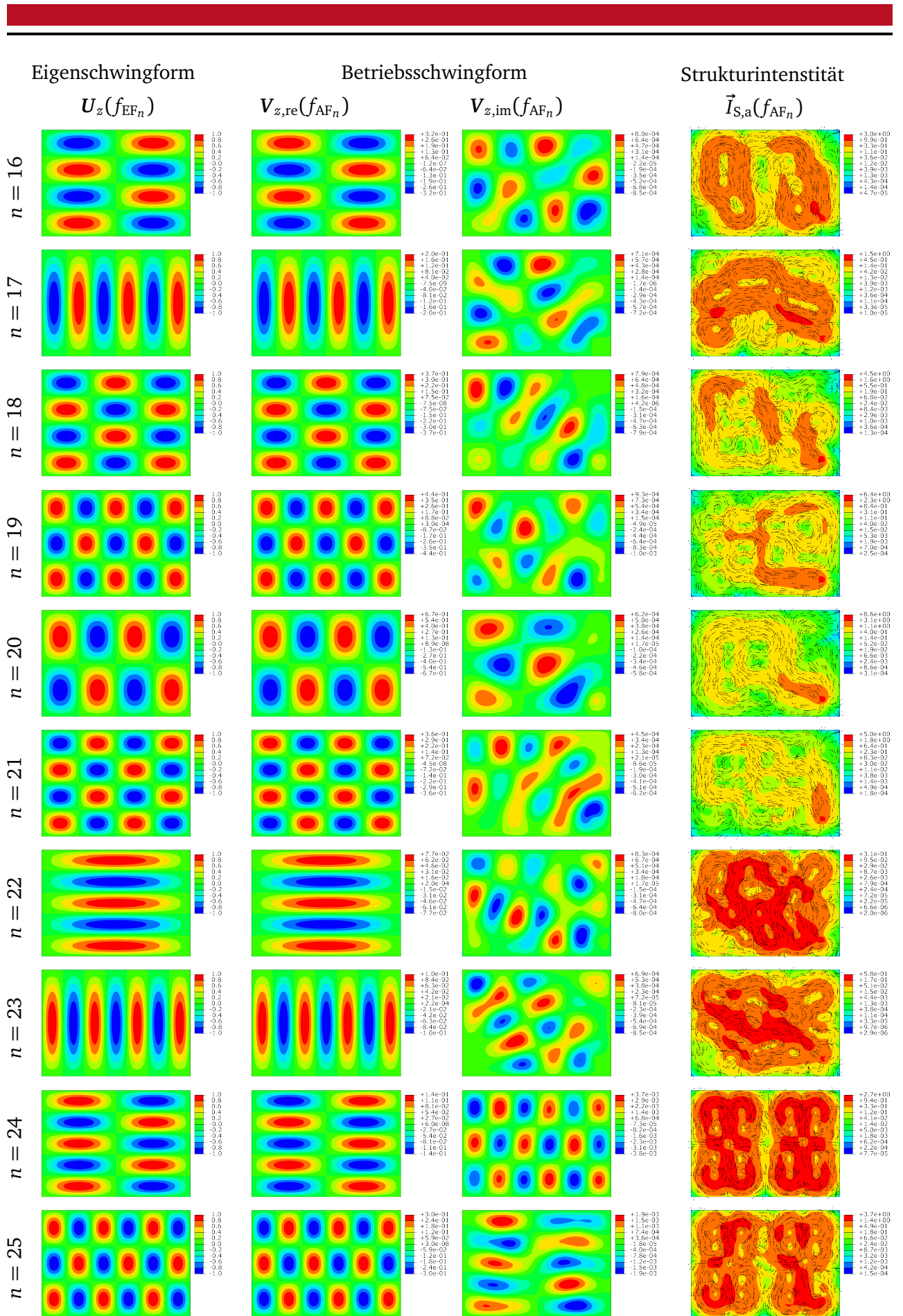


Abbildung A.3: Eigenschwingformen $U_z(f_{EF_n})$, Betriebsschwingformen ($V_{z,re}(f_{AF_n})$, $V_{z,im}(f_{AF_n})$) und Strukturintensität $\tilde{I}_{S,a}(f_{AF_n})$ der Platte für $n \in [16 \ 25]$

A.2 Ergänzungen zum Basismodell des Gepäckraumbodens

Tabelle A.2: Eigenfrequenzen (EF) des Gepäckraumbodens

EF-Nr.	Frequenz in Hz	EF-Nr.	Frequenz in Hz	EF-Nr.	Frequenz in Hz	EF-Nr.	Frequenz in Hz
1	39,1	8	103,3	15	164,1	22	193,7
2	50,6	9	115,5	16	172,6	23	195,5
3	57,8	10	128,2	17	174,7	24	202,2
4	75,9	11	137,4	18	175,4	25	214,8
5	87,9	12	157,4	19	175,4		
6	94,0	13	159,5	20	184,0		
7	101,3	14	161,6	21	189,4		

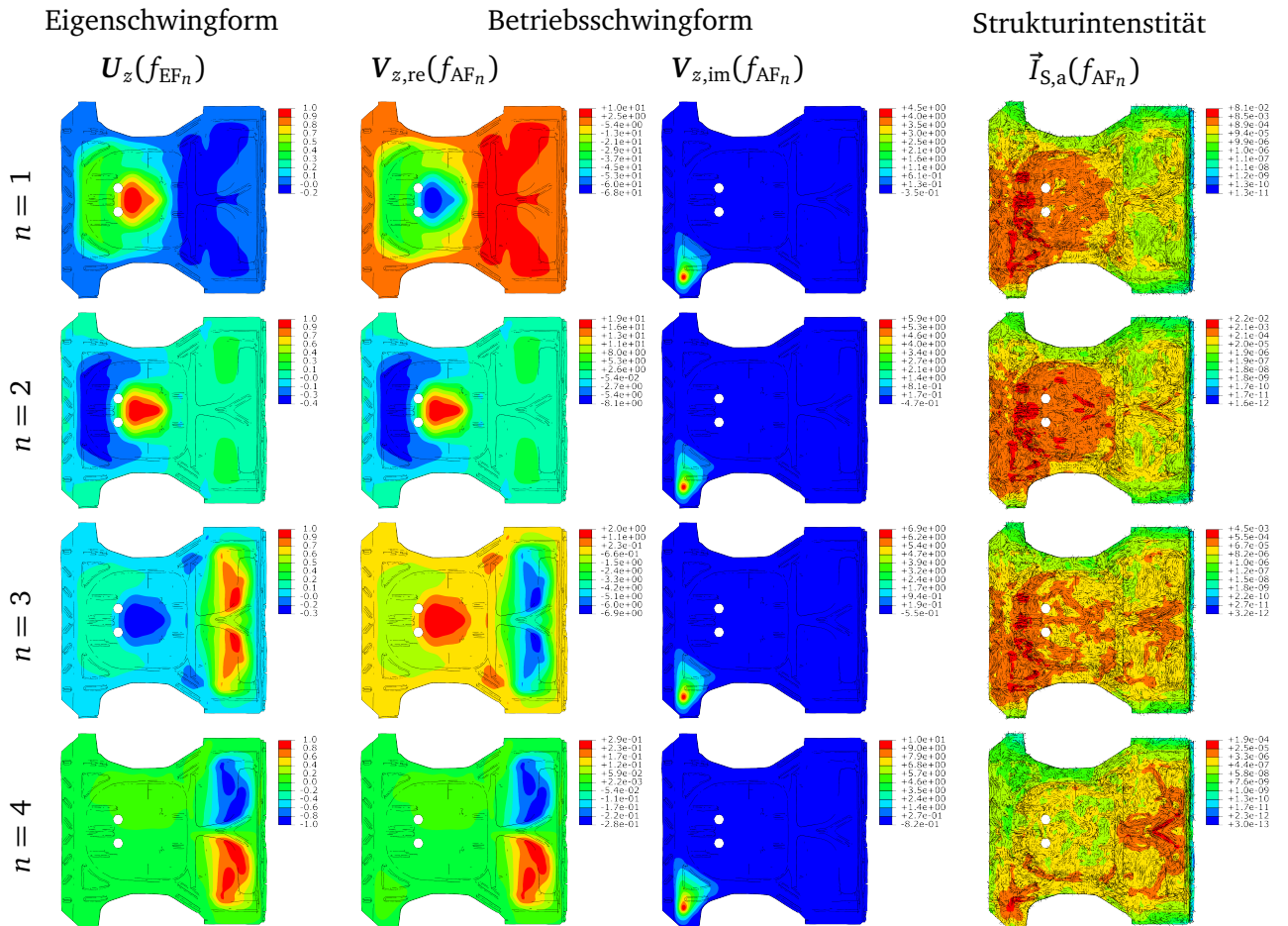


Abbildung A.4: Eigenschwingformen $U_z(f_{EF_n})$, Betriebsschwingformen ($V_{z, \text{re}}(f_{AF_n})$, $V_{z, \text{im}}(f_{AF_n})$) und Strukturintensität $\vec{I}_{S,a}(f_{AF_n})$ des Gepäckraumbodens für $n \in [1 4]$

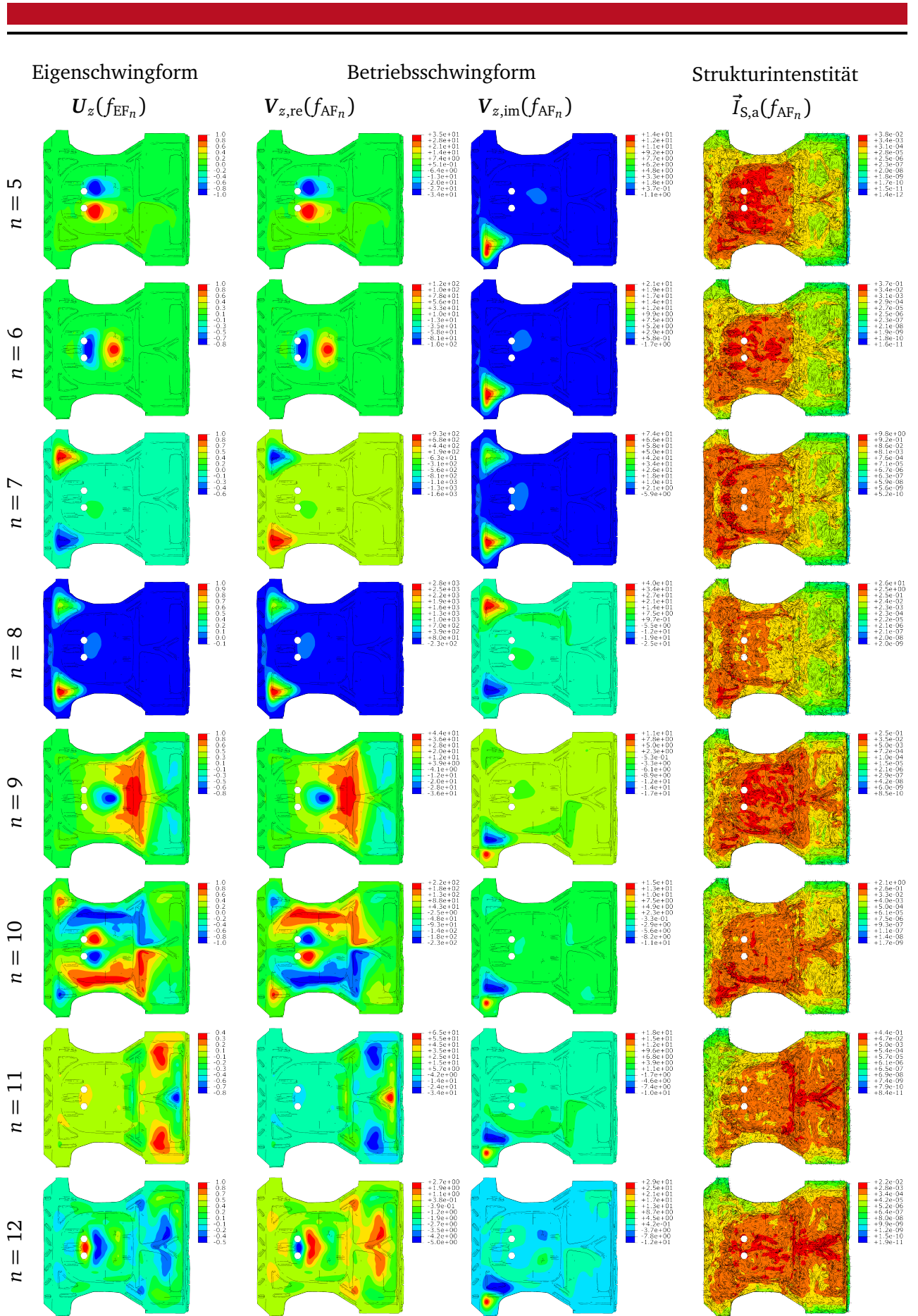


Abbildung A.5: Eigenschwingformen $U_z(f_{EF_n})$, Betriebsschwingformen ($V_{z,re}(f_{AF_n})$, $V_{z,im}(f_{AF_n})$) und Strukturintensität $\tilde{I}_{S,a}(f_{AF_n})$ des Gepäckraumbodens für $n \in [5 \ 12]$

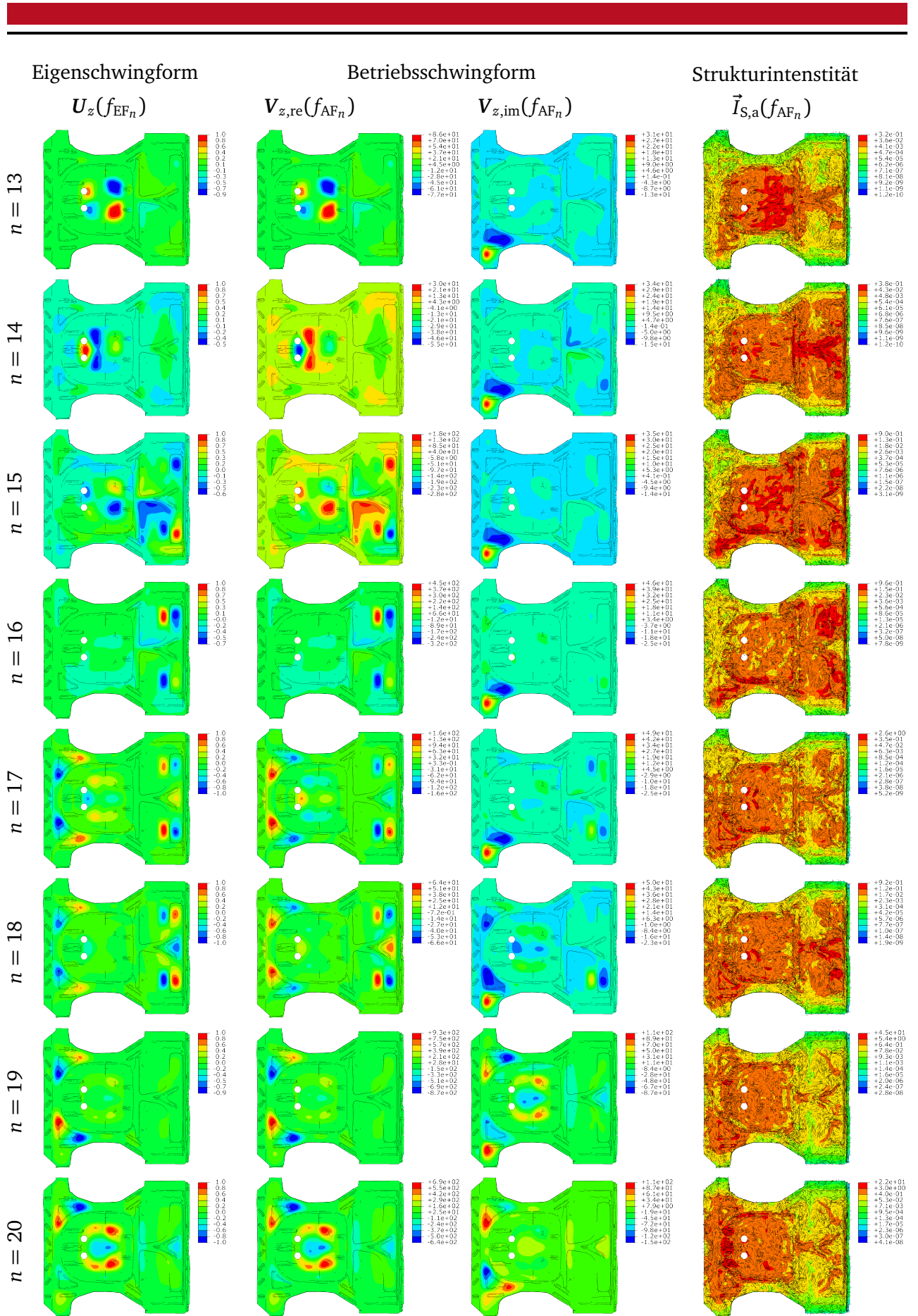


Abbildung A.6: Eigenschwingformen $U_z(f_{EF_n})$, Betriebsschwingformen ($V_{z, \text{re}}(f_{AF_n})$, $V_{z, \text{im}}(f_{AF_n})$) und Strukturintensität $\tilde{I}_{S,a}(f_{AF_n})$ des Gepäckraumbodens für $n \in [12 \ 20]$

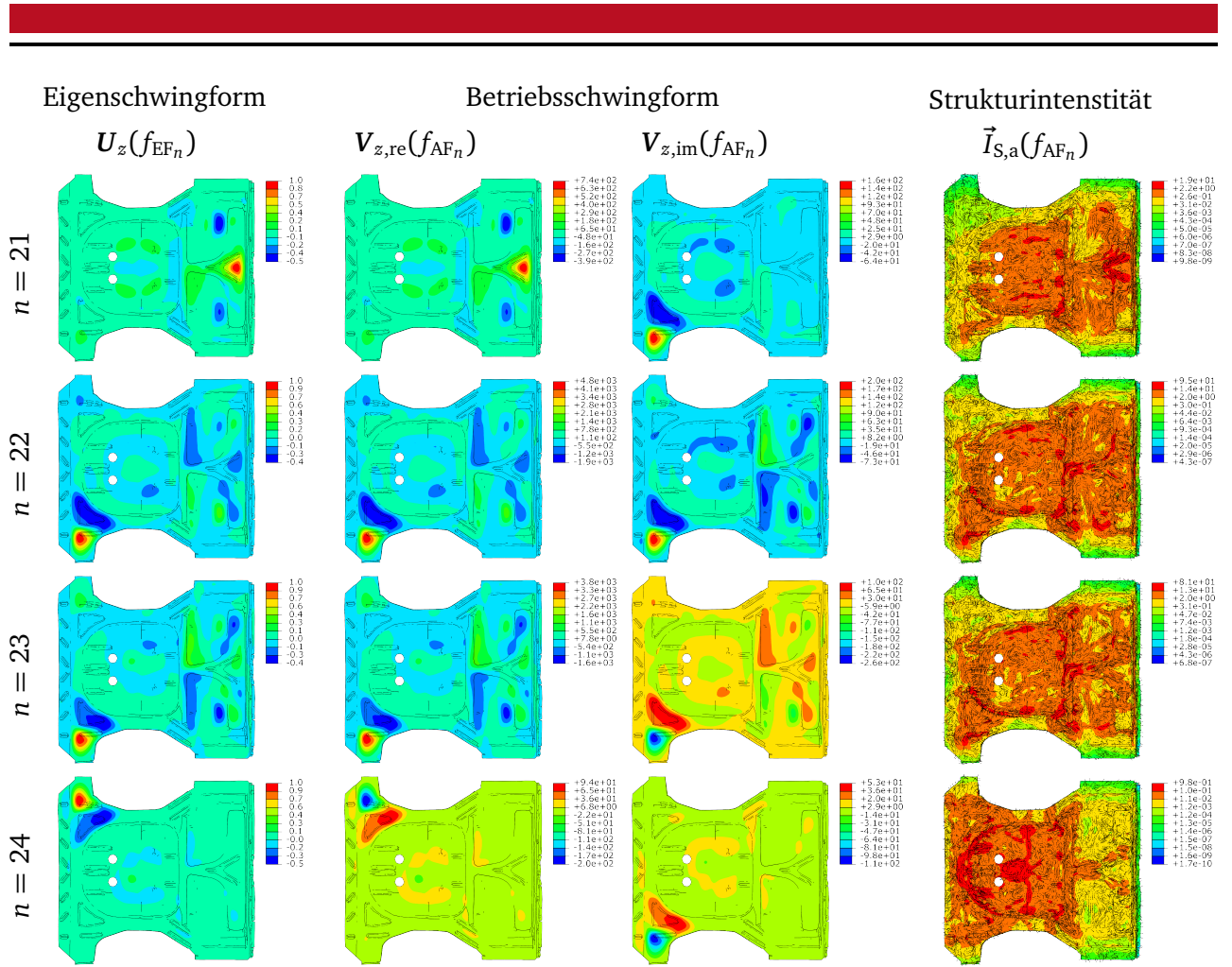


Abbildung A.7: Eigenschwingformen $U_z(f_{EF_n})$, Betriebsschwingformen ($V_{z,re}(f_{AF_n})$, $V_{z,im}(f_{AF_n})$) und Strukturintensität $\vec{I}_{S,a}(f_{AF_n})$ des Gepäckraumbodens für $n \in [21 \ 25]$

A.3 Ergänzungen zum experimentellen Basismodell der Platte

Tabelle A.3: gemessene Resonanzfrequenzen (RF) der Platte

RF-Nr.	Frequenz in Hz	RF-Nr.	Frequenz in Hz	RF-Nr.	Frequenz in Hz
1	57,8	6	280,9	11	440,8
2	103,3	7	300,6	12	448,6
3	153,7	8	315,0	13	542,0
4	185,2	9	361,1	14	554,5
5	200,6	10	395,3	15	581,6

A.4 Ergänzungen zum Luftmodell

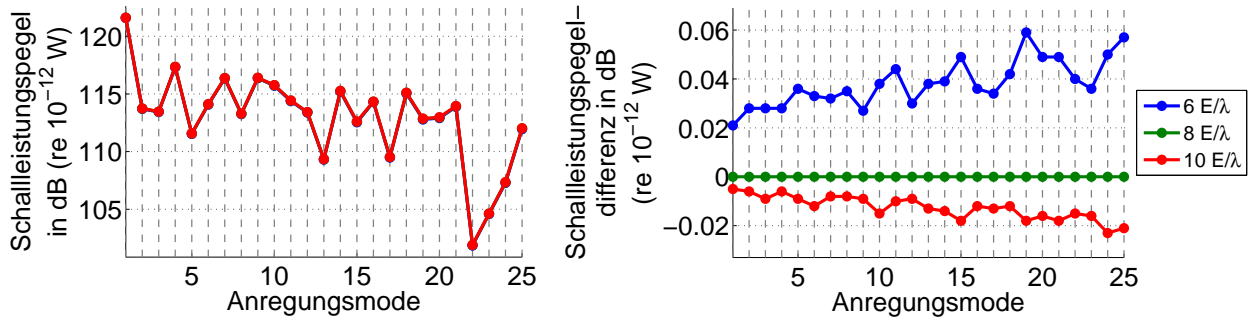


Abbildung A.8: Schallleistungspegel und Schallleistungspegeldifferenz bzgl. $8E/\lambda$ der Platte bei einem dimensionslosen Luftradius von $kr_{\text{Luft}} = 10$ für verschiedene Elementanzahlen E pro Wellenlänge λ

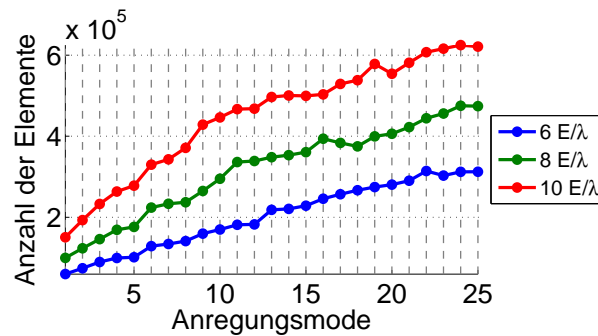


Abbildung A.9: Elementanzahl des Luftmodells bei einem dimensionslosen Luftradius von $kr_{\text{Luft}} = 10$ für verschiedene Elementanzahlen E pro Wellenlänge λ

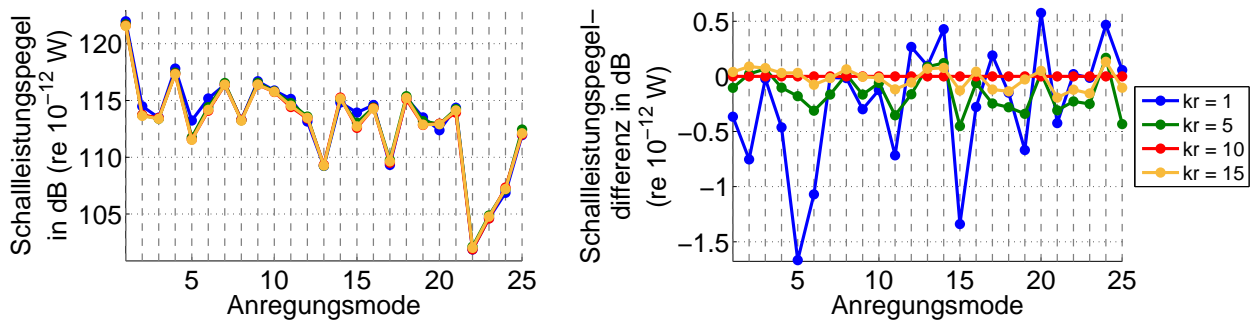


Abbildung A.10: Schallleistungspegel und Schallleistungspegeldifferenz bzgl. $kr_{\text{Luft}} = 10$ der Platte bei einer Vernetzung von 8 Elementen pro Wellenlänge für verschiedene dimensionslose Luftradien kr_{Luft}

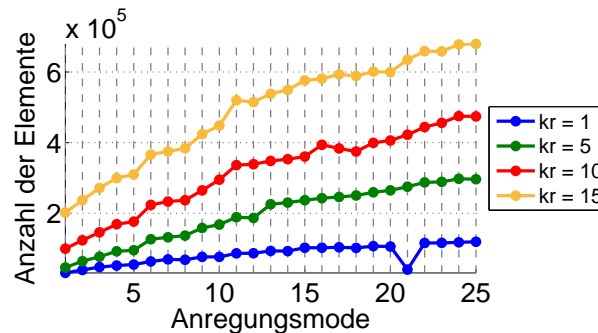


Abbildung A.11: Elementanzahl des Luftmodells bei einer Vernetzung von 8 Elementen pro Wellenlänge für verschiedene dimensionslose Luftradien kr_{Luft}

A.5 Berechnungsgleichungen der skalaren Kenngrößen

Tabelle A.4: Berechnungsvorschrift der skalaren Kenngrößen

(Die Menge E umfasst die Elementindizes aller N_E Elemente $E = \{1, 2, 3, \dots, N_E\}$.)

Kenngröße	Berechnungsvorschrift
maximale Flussdichte	$FD_{\max} = \max_{i \in E} (FD_i)$
minimale Flussdichte	$FD_{\min} = \min_{i \in E} (FD_i)$
flächengewichtet aufsummierte Flussdichte	$FD_{\text{sum}} = \frac{1}{A_{\text{ges}}} \sum_{i=1}^{N_E} (FD_i \cdot A_i)$
flächengewichtet quadratisch aufsummierte Flussdichte	$FD_{\text{sum}}^2 = \frac{1}{A_{\text{ges}}} \sum_{i=1}^{N_E} (FD_i^2 \cdot A_i)$
Median der Flussdichte	$FD_{\text{med}} = \begin{cases} FD_{\frac{N_E+1}{2}} & \text{für ungerade } N_E \\ \frac{1}{2} (FD_{\frac{N_E}{2}} + FD_{\frac{N_E}{2}+1}) & \text{für gerade } N_E \end{cases}$
arithmetischer Mittelwert der Flussdichte	$FD_{\text{arith}} = \frac{1}{N_E} \sum_{i=1}^{N_E} FD_i$
Standardabweichung der Flussdichte	$FD_{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N_E - 1} \sum_{i=1}^{N_E} (FD_i - FD_{\text{arith}})^2}$
Schiefe der Flussdichte	$FD_{\text{Schiefe}} = \frac{1}{N_E} \sum_{i=1}^{N_E} \left(\frac{FD_i - FD_{\text{arith}}}{FD_{\sigma}} \right)^3$
arithmetischer Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt	$FD_{F,\text{arith}} = \frac{1}{N_{E_F}} \sum_{i=1}^{N_{E_F}} FD_i$ mit $E_F := \{i \in E \mid FD_i \text{ an Ort der Kraftanregung grenzend}\}$
Differenz zwischen dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt	$\Delta FD_{F,\text{arith}-\text{arith}} = FD_{F,\text{arith}} - FD_{\text{arith}}$
prozentualer Flächenanteil bezogen auf ein $Y\sigma$ -Streuband um den Median der Flussdichte	$A_{Y\sigma, FD_{\text{med}}} = \frac{1}{A_{\text{ges}}} \sum_{i=1}^{N_{E_Y}} A_i$ mit $Y \in \{1; 0,5\}$ und $E_Y := \{i \in E \mid FD_{\text{med}} - Y \cdot FD_{\sigma} \leq FD_i \leq FD_{\text{med}} + Y \cdot FD_{\sigma}\}$
prozentualer Flussdichteanteil bezogen auf ein $Y\sigma$ -Streuband um den Median der Flussdichte	$FD_{Y\sigma, FD_{\text{med}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_E} FD_i} \sum_{i=1}^{N_{E_Y}} FD_i$ mit $Y \in \{1; 0,5\}$ und $E_Y := \{i \in E \mid FD_{\text{med}} - Y \cdot FD_{\sigma} \leq FD_i \leq FD_{\text{med}} + Y \cdot FD_{\sigma}\}$
prozentualer Flächenanteil bezogen auf das Maximum der Flussdichte	$A_{ZFD_{\max}} = \frac{1}{A_{\text{ges}}} \sum_{i=1}^{N_{E_Z}} A_i$ mit $Z \in \{0,1; 0,5; 0,25; 0,001\}$ und $E_Z := \{i \in E \mid FD_i \geq Z \cdot FD_{\max}\}$

A.6 Darstellung der Korrelation der STI-basierten skalaren Kenngrößen miteinander

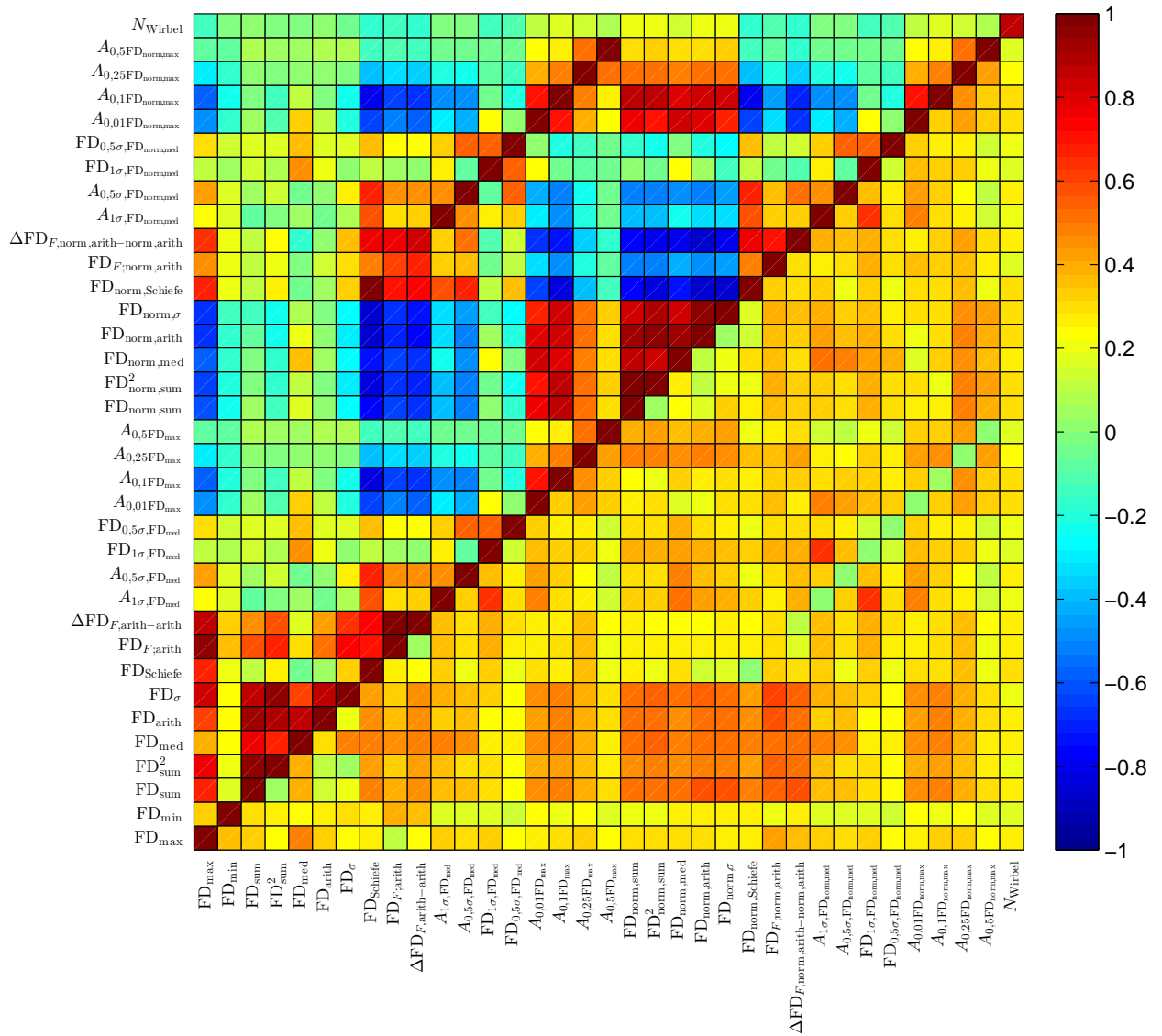


Abbildung A.12: Mittelwert (linke, obere Diagonalmatrix + Diagonale) und Standardabweichung (rechte, untere Diagonalmatrix) der Korrelationswerte aller Anregungsmoden für das gesamte STI-Vektorfeld

Der Diagonalwert bei N_{Wirbel} entspricht im Gegensatz zu allen anderen Diagonalwerten nicht Eins, da die Wirbelanzahl in den ersten beiden Anregungsmoden für alle Modelle Null beträgt und für diese beiden Anregungsmoden daher kein Korrelationswert berechnet werden kann. Zur Bestimmung der mittleren Korrelation wurden beide Werte manuell zu Null gesetzt.

A.7 Ergänzungen zu den STI-basierten Strukturmodifikationen

Tabelle A.5: Werte für Masse und Materialparameter bei unterschiedlichen Modifikationseinstellungen für die Plattenmodelle $FD_{A,X} \%$, 1...25

Nr.	Dicke in mm	Masse in kg		Dichte in kg/m ³		Elastizitätsmodul in N/m ²	
		A_{\min}	A_{\max}	A_{\min}	A_{\max}		
1	5	konst. 1		400000	1853,57	$1,04 \cdot 10^{13}$	$4,82 \cdot 10^{10}$
2	5	konst. 0,5		20000	926,78	$5,20 \cdot 10^{12}$	$2,41 \cdot 10^{10}$
3	5	konst. 0,1		40000	185,36	$1,04 \cdot 10^{12}$	$4,82 \cdot 10^9$
4	5	0,02	4,24	konst. 7850		konst. $2,04 \cdot 10^{11}$	
5	2,5	0,01	2,12	konst. 7850		konst. $2,04 \cdot 10^{11}$	

Tabelle A.6: Werte für Masse und Materialparameter bei unterschiedlichen Modifikationseinstellungen für die Plattenmodelle $FD_{\max,X} \%$, 1...25

Nr.	Dicke in mm	Masse in kg		Dichte in kg/m ³		Elastizitätsmodul in N/m ²	
		A_{\min}	A_{\max}	A_{\min}	A_{\max}		
1	5	konst. 1		2000000	970,4	$5,2 \cdot 10^{13}$	$2,52 \cdot 10^{10}$
2	5	konst. 0,5		1000000	485,2	$2,6 \cdot 10^{13}$	$1,26 \cdot 10^{10}$
3	5	konst. 0,1		200000	97,04	$5,2 \cdot 10^{12}$	$2,52 \cdot 10^9$
4	5	0,004	8,09	konst. 7850		konst. $2,04 \cdot 10^{11}$	
5	2,5	0,002	4,04	konst. 7850		konst. $2,04 \cdot 10^{11}$	

Tabelle A.7: Werte für Masse und Materialparameter bei unterschiedlichen Modifikationseinstellungen für die Gepäckraumbodenmodelle $FD_{A,X} \%$, 1...25

Nr.	Dicke in mm	Masse in kg		Dichte in kg/m ³		Elastizitätsmodul in N/m ²	
		A_{\min}	A_{\max}	A_{\min}	A_{\max}		
1	0,705	konst. 1		650400	3249,6	$1,74 \cdot 10^{13}$	$8,68 \cdot 10^{10}$
2	0,705	konst. 0,5		325080	1620	$8,7 \cdot 10^{12}$	$4,34 \cdot 10^{10}$
3	0,705	konst. 0,1		65040	324,96	$1,74 \cdot 10^{12}$	$8,68 \cdot 10^9$
4	0,705	0,012	2,42	konst. 7850		konst. $2,1 \cdot 10^{11}$	
5	0,3525	0,006	1,21	konst. 7850		konst. $2,1 \cdot 10^{11}$	

A.8 ERP-Skalarfelder der Platte

Bei den dargestellten ERP-Skalarfeldern in den Abbildungen A.13–A.15 handelt es sich um die ERP-Pegeldifferenzen bzgl. des Basismodells der Platte in dB (re 10^{-12} W). Die zugehörigen ERP-Pegel des Basismodells, die den ERP-Pegeldifferenzen zugrunde liegen, sind für jede Anregungsmode f_{AF_n} mit angegeben.

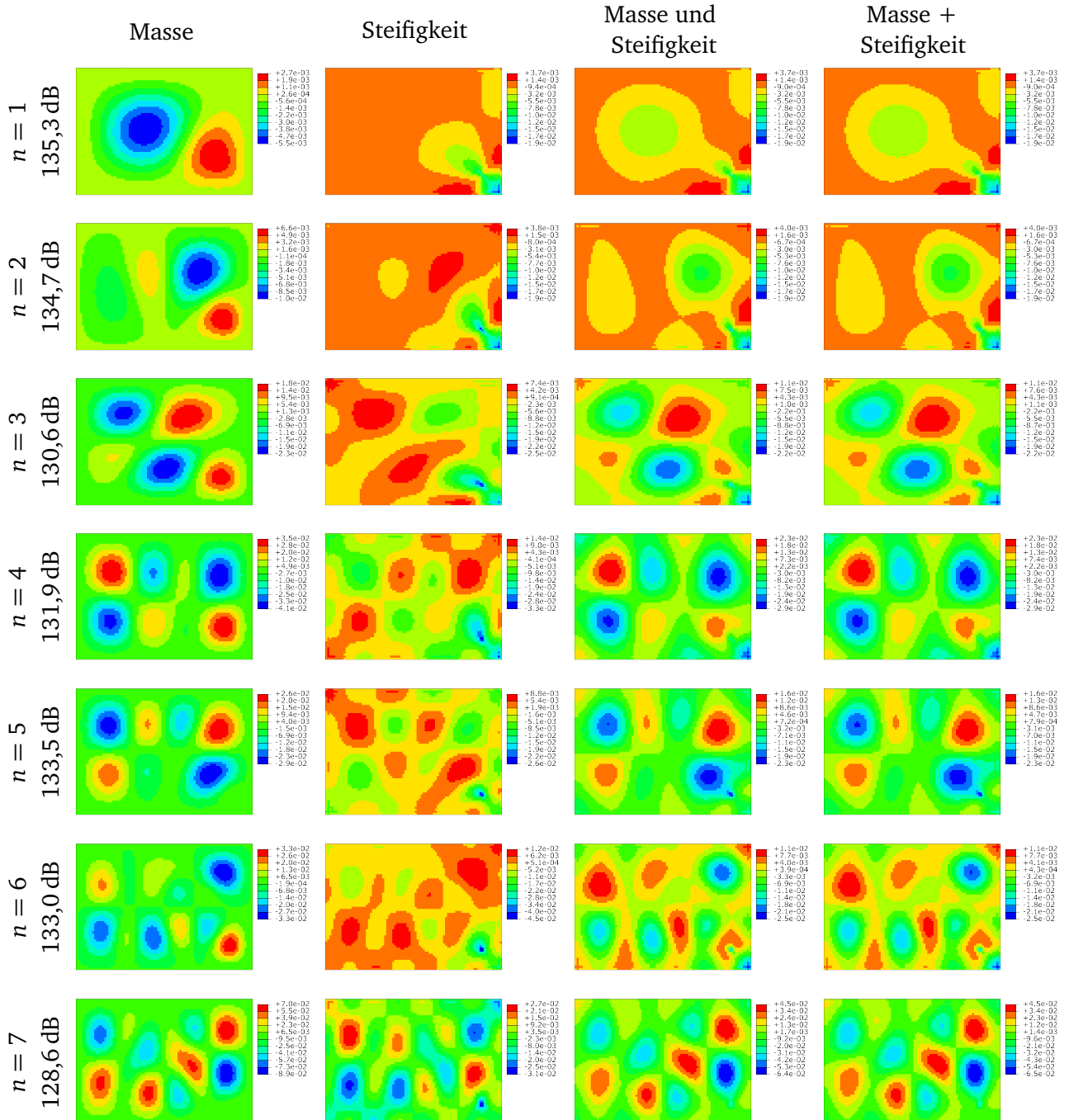


Abbildung A.13: ERP-Skalarfelder der Platte für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [1 \ 7]$

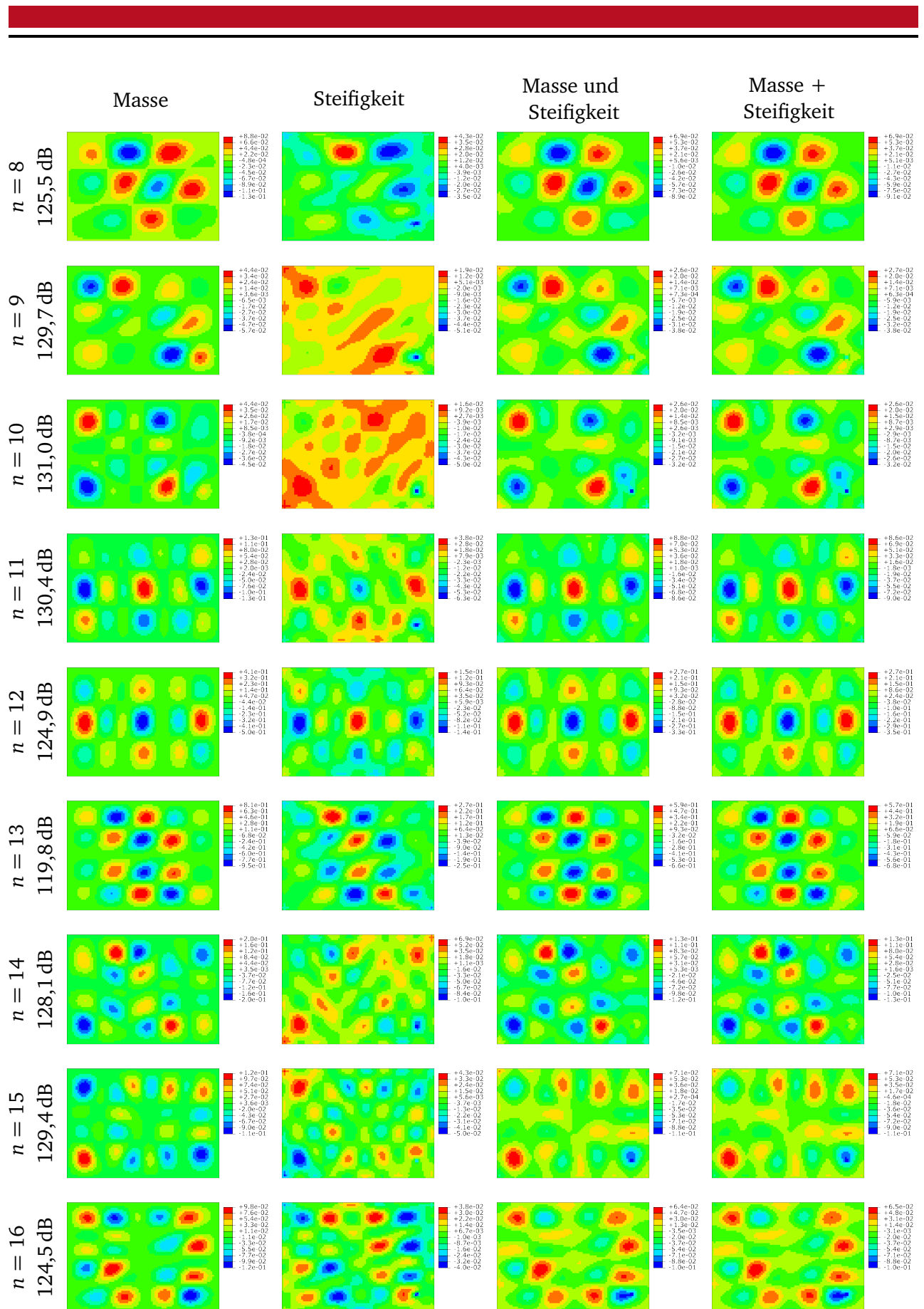


Abbildung A.14: ERP-Skalarfelder der Platte für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [8 \ 16]$

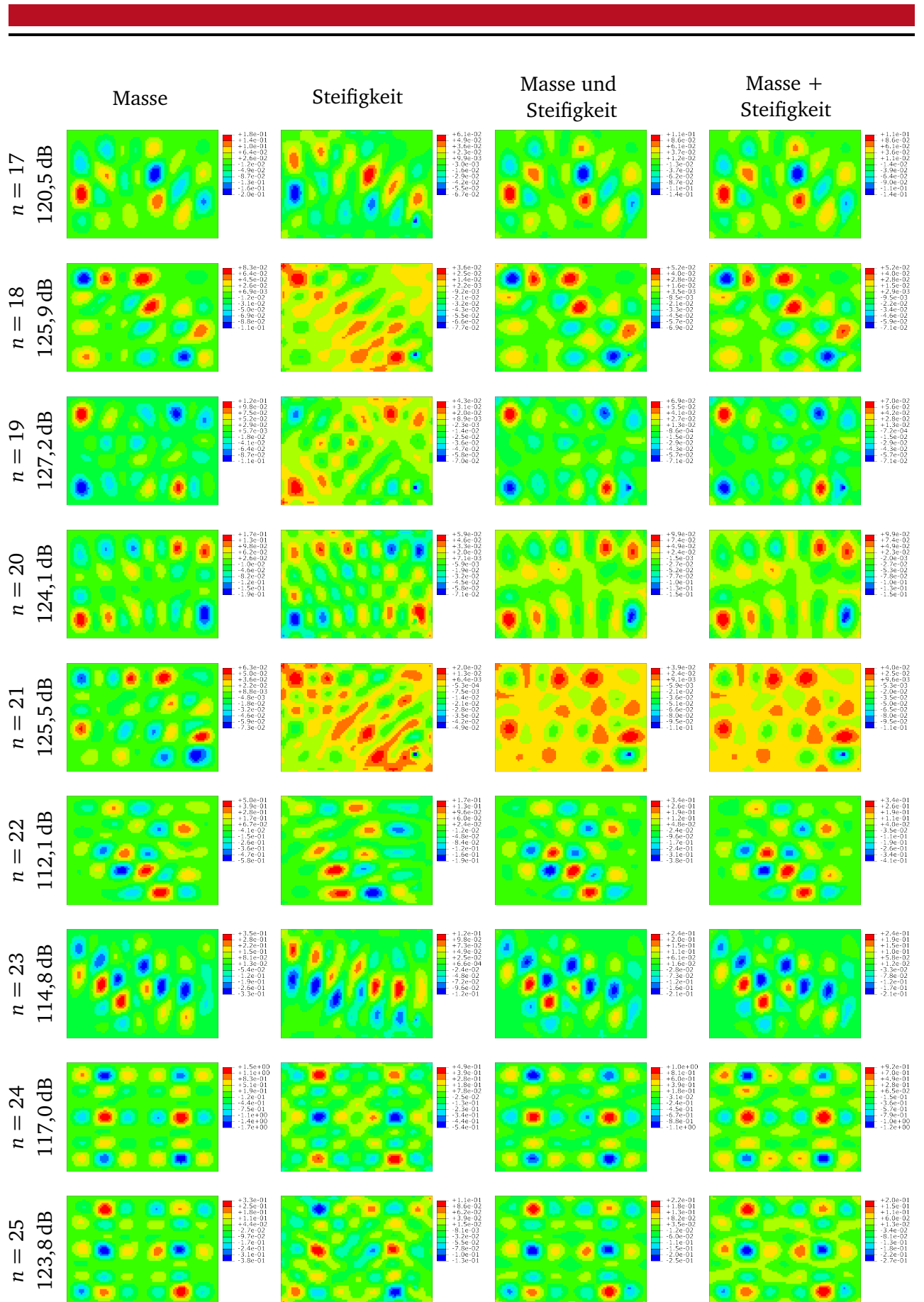


Abbildung A.15: ERP-Skalarfelder der Platte für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [17 \ 25]$

A.9 ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens

Bei den dargestellten ERP-Skalarfeldern in den Abbildungen A.16–A.19 handelt es sich um die ERP-Pegeldifferenzen bzgl. des Basismodells des Gepäckraumbodens in dB (re 10^{-12} W). Die zugehörigen ERP-Pegel des Basismodells, die den ERP-Pegeldifferenzen zugrunde liegen, sind für jede Anregungs-mode f_{AF_n} mit angegeben.

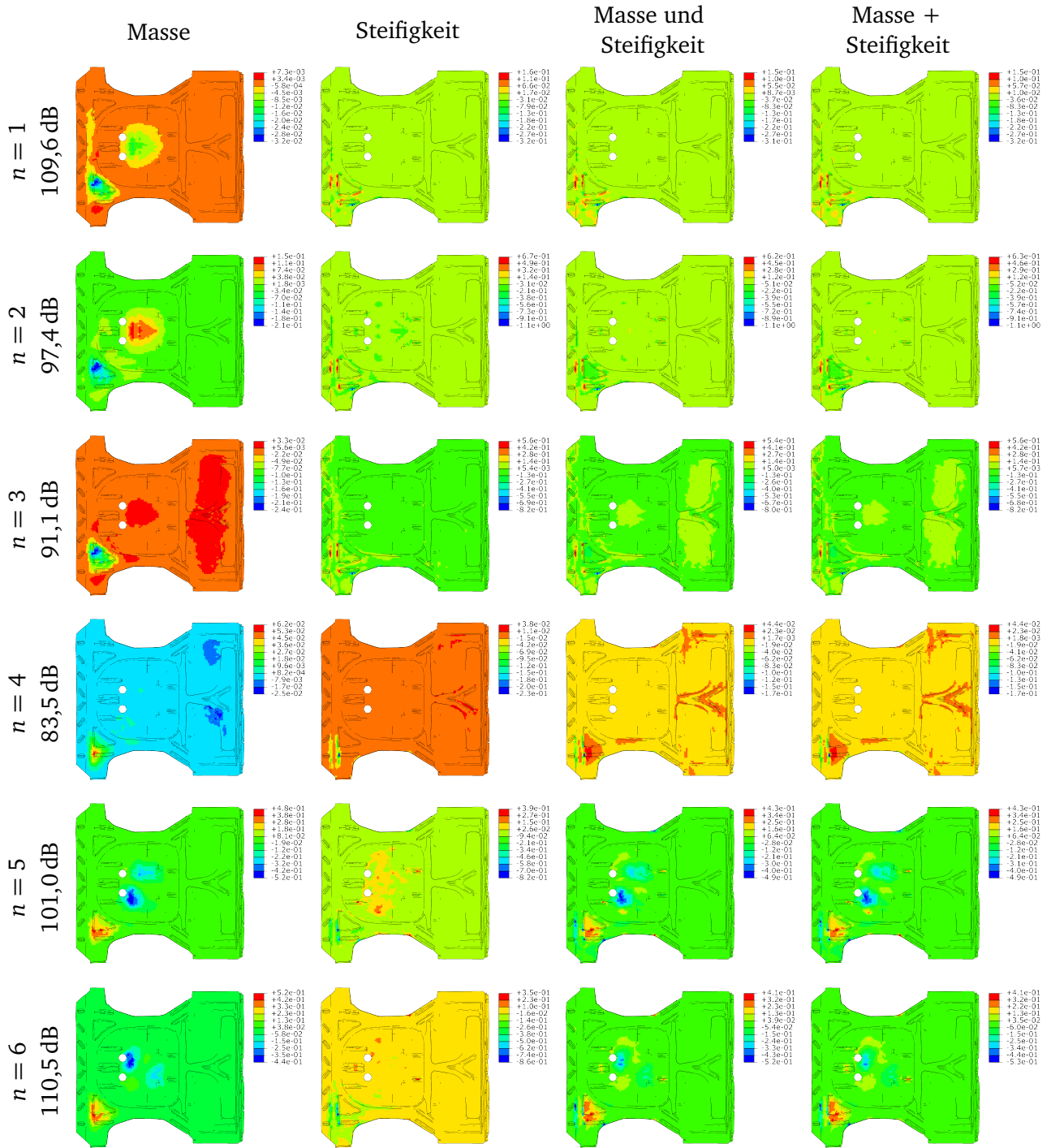


Abbildung A.16: ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [1\ 6]$

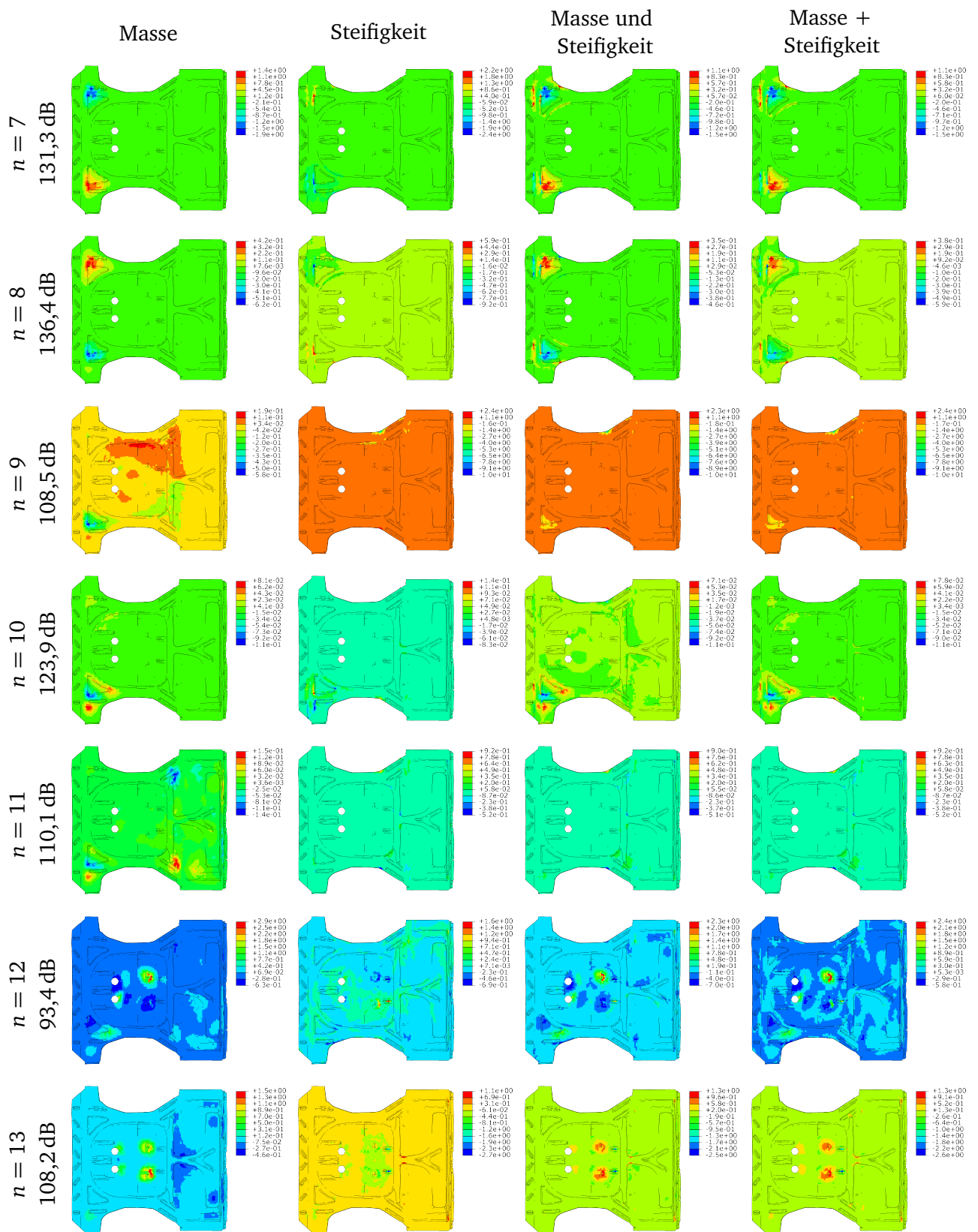


Abbildung A.17: ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [7 \ 13]$

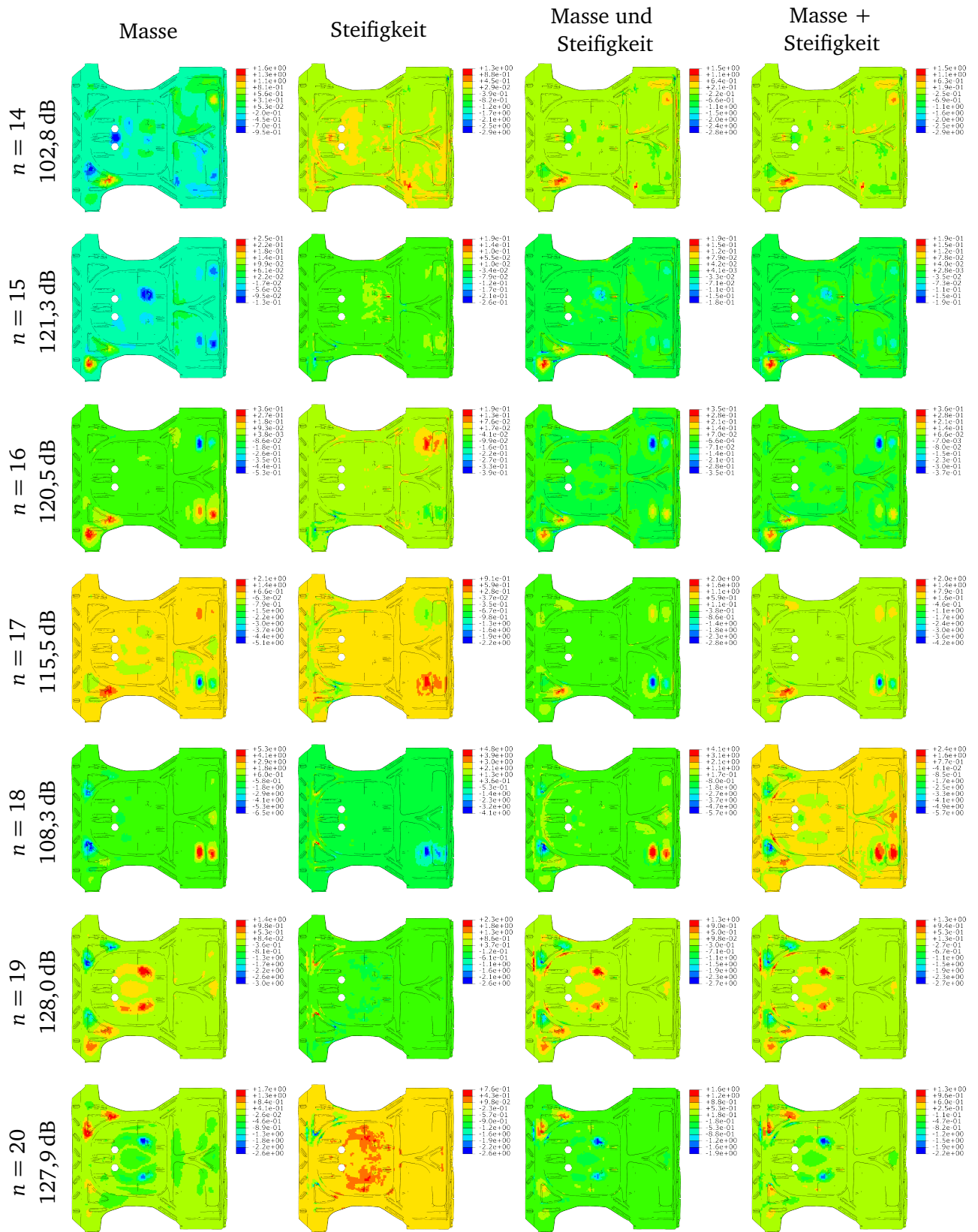


Abbildung A.18: ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [14 \ 20]$

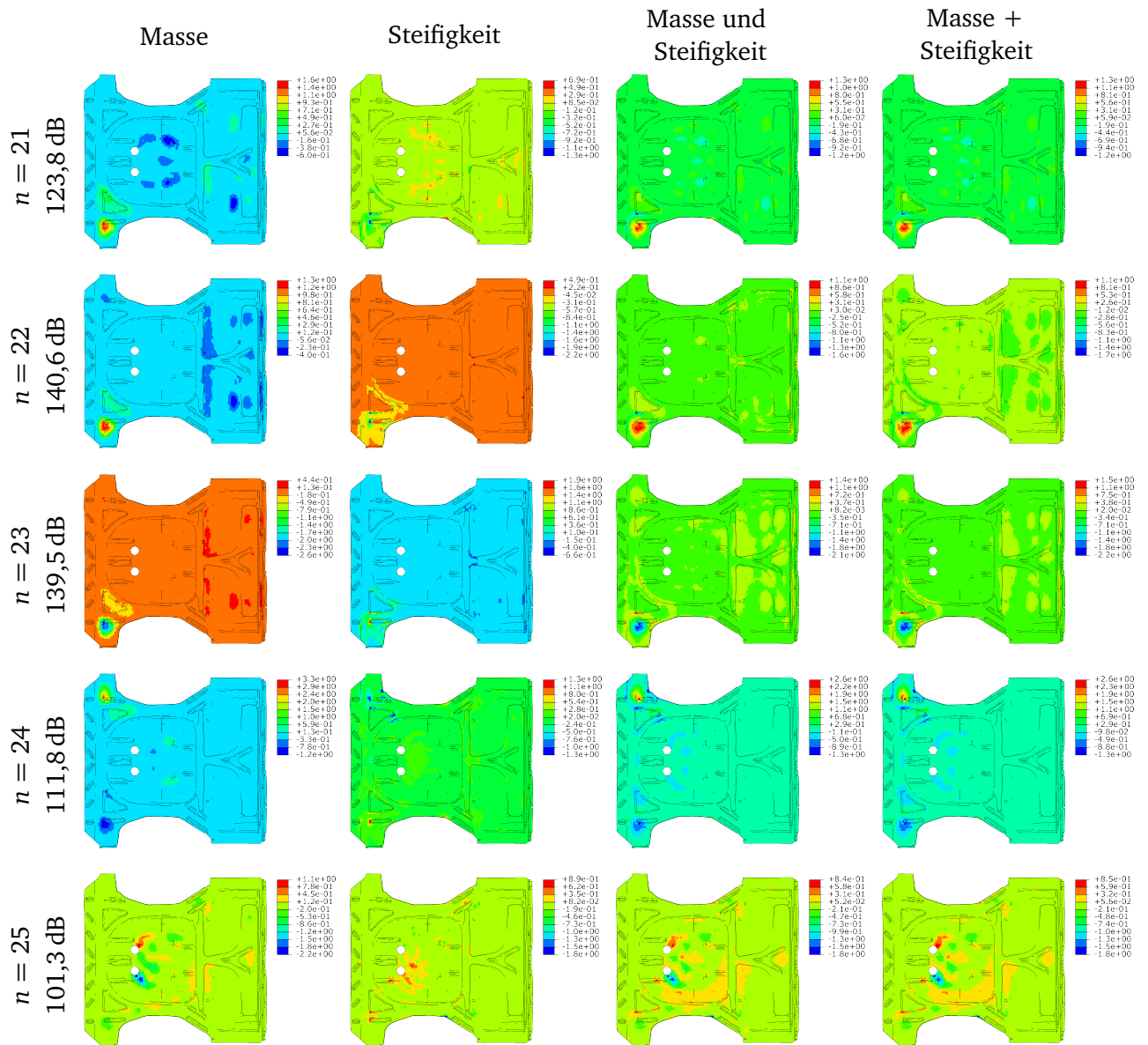


Abbildung A.19: ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [21 \ 25]$

A.10 Ergänzungen zu den Strukturmodifikationen basierend auf den ERP-Skalarfeldern

Tabelle A.8: Werte für Masse und Materialparameter bei unterschiedlichen Modifikationseinstellungen für die Plattenmodelle $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ und $ERP_{\max, X \%, 1...25}$

Fall-Nr.	Nr.	Dicke in mm	Masse in kg		Dichte in kg/m ³		Elastizitätsmodul in N/m ²	
			A_{\min}	A_{\max}	A_{\min}	A_{\max}		
Fall 1	1	5	konst. 1		400000	1853,57	konst. 0,0001	
	2	5	konst. 0,5		20000	926,78	konst. 0,0001	
	3	5	konst. 0,1		40000	185,36	konst. 0,0001	
	4	5	0,02	4,24	konst. 7850		konst. 0,0001	
	5	2,5	0,01	2,12	konst. 7850		konst. 0,0001	
Fall 2	4	5	konst. 0		konst. 0		konst. $2,04 \cdot 10^{11}$	
	5	2,5	konst. 0		konst. 0		konst. $2,04 \cdot 10^{11}$	
Fall 3	1	5	konst. 1		400000	1853,57	$1,04 \cdot 10^{13}$	$4,82 \cdot 10^{10}$
	2	5	konst. 0,5		20000	926,78	$5,20 \cdot 10^{12}$	$2,41 \cdot 10^{10}$
	3	5	konst. 0,1		40000	185,36	$1,04 \cdot 10^{12}$	$4,82 \cdot 10^9$
	4	5	0,02	4,24	konst. 7850		konst. $2,04 \cdot 10^{11}$	
	5	2,5	0,01	2,12	konst. 7850		konst. $2,04 \cdot 10^{11}$	

Tabelle A.9: Werte für Masse und Materialparameter bei unterschiedlichen Modifikationseinstellungen für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ und $ERP_{\max, X \%, 1...25}$

Fall-Nr.	Nr.	Dicke in mm	Masse in kg		Dichte in kg/m ³		Elastizitätsmodul in N/m ²	
			A_{\min}	A_{\max}	A_{\min}	A_{\max}		
Fall 1	1	0,705	konst. 1		649620	3249,8	konst. 0,0001	
	2	0,705	konst. 0,5		324860	1620	konst. 0,0001	
	3	0,705	konst. 0,1		64962	325	konst. 0,0001	
	4	0,705	0,012	2,42	konst. 7850		konst. $2,1 \cdot 10^{11}$	
	5	0,3525	0,006	1,21	konst. 7850		konst. $2,1 \cdot 10^{11}$	
Fall 2	4	0,705	konst. 0		konst. 0		konst. $2,1 \cdot 10^{11}$	
	5	0,3525	konst. 0		konst. 0		konst. $2,1 \cdot 10^{11}$	
Fall 3	1	0,705	konst. 1		649140	3250	$1,74 \cdot 10^{13}$	$8,68 \cdot 10^{10}$
	2	0,705	konst. 0,5		324620	1620	$8,68 \cdot 10^{12}$	$4,34 \cdot 10^{10}$
	3	0,705	konst. 0,1		64914	325	$1,74 \cdot 10^{12}$	$8,68 \cdot 10^9$
	4	0,705	0,012	2,42	konst. 7850		konst. $2,1 \cdot 10^{11}$	
	5	0,3525	0,006	1,21	konst. 7850		konst. $2,1 \cdot 10^{11}$	

A.11 Verwendete Optimierungseinstellungen des genetischen Algorithmus

Tabelle A.10: verwendete Optimierungseinstellungen des genetischen Algorithmus – der Matlab-Funktion *ga*
(Alle weiteren Einstellmöglichkeiten entsprechen den Standardwerten [79].)

Option	Wert
'ConstraintTolerance'	$1 \cdot 10^{-6}$
'CrossoverFraction'	0,5
'EliteCount'	3
'FitnessLimit'	– inf
'FunctionTolerance'	$1 \cdot 10^{-6}$
'InitialPopulationRange'	[0; 1]
'MaxGenerations'	1000
'MaxStallGenerations'	50
'MaxStallTime'	inf
'MaxTime'	inf
'PopulationSize'	50

Abbildungsverzeichnis

2.1	Definition der Schnittkräfte und -momente sowie der rotatorischen und translatorischen Schwinggeschwindigkeiten	15
2.2	beispielhafte Darstellung der Strukturintensität in einer Platte	15
2.3	qualitativer Abstrahlgrad einer schallabstrahlenden Rechteckplatte	17
2.4	Leistungen an einer schwingenden Struktur	18
3.1	qualitativer Verlauf der ERP-Pegel über der Frequenz	20
3.2	Analysemethode zur Bestimmung des Strukturverhaltens	21
3.3	qualitativer Verlauf der ERP-Pegel bei alleiniger Auswertung an den Anregungsmoden .	21
3.4	Basismodell der Platte	22
3.5	Pegel der Eingangsleistung und ERP bei der Platte für die Anregungsmoden 1–25 . . .	23
3.6	Gegenüberstellung von Eingangsleistungspegel und Verhältnispegel aus der Schwinggeschwindigkeit am Anregungsort und der maximalen Schwinggeschwindigkeit bei der Platte	23
3.7	Vergleich der 3. Eigenschwingform und der Betriebsschwingform für die Anregungsmoden 3 bei der Platte	24
3.8	Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit über der Anregungsmoden für verschiedene Strukturdämpfungen bei der Platte	24
3.9	qualitative Verläufe der STI bei der Platte für die Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 . .	25
3.10	Basismodell des Gepäckraumbodens	26
3.11	Pegel der Eingangsleistung und ERP beim Gepäckraumboden für die Anregungsmoden 1–25	26
3.12	Vergleich der 3. Eigenschwingform und der Betriebsschwingform für die Anregungsmoden 3 beim Gepäckraumboden	27
3.13	Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit über der Anregungsmoden beim Gepäckraumboden	27
3.14	qualitative Verläufe der STI beim Gepäckraumboden für die Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22	27
3.15	schematische Darstellung der gelenkigen Plattenlagerung im Prüfstand	29
3.16	Prüfstands Aufbau	30
3.17	gemessene Spektren (Pegel von Eingangsleistung und ERP) der Platte bei Anregung mit einem „periodic chirp“	31
3.18	gemessenes Kraftpegelspektrum der Platte bei Anregung mit einem „periodic chirp“ . .	31
3.19	gemessene Spektren der Eingangsleistungspegel und der ERP-Pegel der Platte bei Anregung mit einem „periodic chirp“	32
3.20	Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der gemessenen Geschwindigkeit über der Anregungsmoden bei der Platte	33
3.21	gemessene Betriebsschwingform bei der Platte für die Anregungsmoden 3	33
3.22	Modellparameter der Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“	34
3.23	prinzipieller Aufbau des Luftschallmodells	34
3.24	Vergleich von Schallleistung und ERP für die Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“ . .	37
3.25	Pegeldifferenz von Schallleistung und ERP zwischen der Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“ und der einfachen Platte	37
4.1	Vergleich der STI-Verläufe in zwei unterschiedlich modifizierten Plattenmodellen bei gleicher Anregungsmoden	39
4.2	Aufteilung des STI-Vektorfeldes in die Skalarfelder Flussdichte und Flussrichtung . . .	40

4.3	Korrelation zwischen skalaren Kenngrößen und der ERP in Form von Mittelwert und Standardabweichung der Korrelationswerte aller Anregungsmoden	45
4.4	Gegenüberstellung der ERP und der maximalen Flussdichte	46
4.5	Gegenüberstellung der ERP und der Differenz zwischen dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt	46
4.6	Gegenüberstellung der ERP und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt	47
4.7	Gegenüberstellung der ERP und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte	47
4.8	Gegenüberstellung der ERP und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der normierten FD-Skalarfelder	48
4.9	Übersicht hoher Korrelationswerte der skalaren Kenngrößen pro Anregungsmode . . .	49
4.10	Gegenüberstellung von ERP und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt für den Gepäckraumboden	50
4.11	Beispiel für die STI-basierte Selektion der Orte (FE-Elemente) für eine Modifikation anhand zweier verschiedener Selektionsvarianten	52
4.12	ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{A,X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1	55
4.13	vergrößerter Ausschnitt der Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{A,X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1	56
4.14	ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{A,X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 3	56
4.15	ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{A,X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4	57
4.16	vergrößerter Ausschnitt der Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{A,X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4	57
4.17	ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP für die Plattenmodelle $FD_{\max, X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1	58
4.18	ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $FD_{A,X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1	58
5.1	Vorgehen zur Entwicklung von Modifikationsregeln anhand einer systematischen Strukturanalyse	60
5.2	Vorgehen der systematischen Strukturmodifikation durch ein Skin-Element zur Erstellung der ERP-Skalarfelder am Beispiel der Platte	62
5.3	Vorgehen zur Erstellung der ERP-Skalarfelder am Beispiel der Anregungsmode 7 für drei Plattenmodelle	63
5.4	qualitative ERP-Skalarfelder der Platte in den Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 für alle drei Modifikationsfälle	64
5.5	qualitative ERP-Skalarfelder der Platte in den Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 für den Modifikationsfall 3 sowie für die Summe der beiden Modifikationsfälle 1 und 2	65
5.6	qualitative ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens in den Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 für alle drei Modifikationsfälle	65
5.7	qualitative ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens in den Anregungsmoden 3, 7, 13 und 22 für den Modifikationsfall 3 sowie für die Summe der beiden Modifikationsfälle 1 und 2	66
5.8	Korrelation der ERP-Skalarfelder der Modifikationsfälle 1 und 2 sowie ihrer Summen mit denen des Modifikationsfalls 3 für Platte und Gepäckraumboden	67
5.9	prozentuale Flächenanteile mit einer negativen Pegeldifferenz der ERP für alle drei Modifikationsfälle in den einzelnen Anregungsmoden für Platte und Gepäckraumboden	68

5.10	Verhältnis der minimal und maximal erzielten Änderungen der ERP-Pegel der drei Modifikationsfälle in den einzelnen Anregungsmoden für Platte und Gepäckraumboden	68
5.11	Beispiel für die ERP-basierte Selektion der Orte (FE-Elemente) für eine Modifikation bei einer prozentualen Begrenzung der Modifikationsfläche	70
5.12	Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\max, X \%, 1...25}$ und $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 und Nr. 3 bei Untersuchung des Masseneinflusses	72
5.13	Ausschnitt der Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 3 bei Untersuchung des Masseneinflusses	72
5.14	Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X \%, 1...25}$ und $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 und Nr. 3 bei Untersuchung des Masseneinflusses	73
5.15	Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für eine Modifikationsmasse von 0,01 kg bei Untersuchung des Masseneinflusses	74
5.16	Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\max, X \%, 1...25}$ und $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4 und Nr. 5 bei Untersuchung des Masseneinflusses	74
5.17	Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X \%, 1...25}$ und $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4 und Nr. 5 bei Untersuchung des Masseneinflusses	75
5.18	Eigenfrequenzänderungen der Plattenmodelle bzgl. des Basismodells bei den Grenzwerten 0,1 % und 20 % für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 und Nr. 3 bei Untersuchung des Masseneinflusses	76
5.19	Eigenfrequenzänderungen der Gepäckraumbodenmodelle bzgl. des Basismodells bei den Grenzwerten 0,1 % und 20 % für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 und Nr. 3 bei Untersuchung des Masseneinflusses	77
5.20	Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP für alle Auslegungsmoden bei der Platte und beim Gepäckraumboden für alle untersuchten Modifikationseinstellungen bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen bei Untersuchung des Masseneinflusses	78
5.21	Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\max, X \%, 1...25}$ und $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4 und Nr. 5 bei Untersuchung des Steifigkeitseinflusses	79
5.22	Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X \%, 1...25}$ und $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 4 und Nr. 5 bei Untersuchung des Steifigkeitseinflusses	80
5.23	Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für eine Modifikationsdicke von 0,0705 mm bei Untersuchung des Steifigkeitseinflusses	80
5.24	Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP für alle Auslegungsmoden bei der Platte und beim Gepäckraumboden für alle untersuchten Modifikationseinstellungen bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen bei Untersuchung des Steifigkeitseinflusses	81
5.25	Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\max, X \%, 1...25}$ und $ERP_{\min, X \%, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 und Nr. 3 bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses	81

5.26	Ausschnitt der Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 3 bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses	82
5.27	Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\max, X \% , 1...25}$ und $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 und Nr. 3 bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses	82
5.28	Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{\min, X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für eine Modifikationsmasse von 0,01 kg bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses	83
5.29	Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP für alle Auslegungsmoden bei der Platte und beim Gepäckraumboden für alle untersuchten Modifikationseinstellungen bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses	83
5.30	Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit \underline{v}_z über der Anregungsmoden n für die Platte und den Gepäckraumboden	84
5.31	Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle Z_{ein} und $ERP_{\min, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für eine Modifikationsmasse von 1 kg und von 0,1 kg	86
5.32	Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $V_{n, \text{mag, max}, 1...25}$ und $ERP_{\min, 1...25}$ bzgl. des Basismodells für eine Modifikationsmasse von 1 kg und von 0,1 kg	87
5.33	iterative Vorgehensweise zum Auffinden von Regressionslösungen der ERP-Skalarfelder basierend auf einer multiplen linearen Regression	90
5.34	Vorgehensweise zur Reduktion der Regressionslösungen auf eine Approximation der ERP-Skalarfelder für jeden der drei Modifikationsfälle	91
5.35	Regressionsergebnisse der ERP-Skalarfelder aller drei Modifikationsfälle in den einzelnen Anregungsmoden für die Platte und für den Gepäckraumboden	93
5.36	Regressionsergebnisse der ERP-Skalarfelder aller drei Modifikationsfälle bei Nachrechnen der Lösungen der einzelnen Anregungsmoden für alle Anregungsmoden für die Platte und den Gepäckraumboden	94
5.37	Regressionsergebnisse der ERP-Skalarfelder aller drei Modifikationsfälle bei Nachrechnen der Lösungen des jeweils anderen Basismodells der einzelnen Anregungsmoden für alle Anregungsmoden für die Platte und den Gepäckraumboden	95
5.38	Pegeldifferenzen der ERP für die Plattenmodelle $R_{\max, X \% , 1...25}$ und $R_{\min, X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für die Modifikationseinstellungen Nr. 1 und Nr. 3 bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses	100
5.39	Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP bei der Platte für alle Auslegungsmoden, alle Modifikationseinstellungen sowie alle drei Modifikationsfälle bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen	101
5.40	Pegeldifferenzen der ERP für die Gepäckraumbodenmodelle $R_{\max, X \% , 1...25}$ und $R_{\min, X \% , 1...25}$ bzgl. des Basismodells für Massenerhöhungen um 0,1 kg und um 0,01 kg bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses	102
5.41	Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP beim Gepäckraumboden für alle Auslegungsmoden, alle Modifikationseinstellungen sowie alle drei Modifikationsfälle bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen	102
5.42	Basismodell des Wagenbodens	103
5.43	ERP- und Eingangsleistungspegel sowie Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit \underline{v}_z über der Anregungsmoden n für das Wagenbodenblech . .	103

5.44	Pegeldifferenzen der ERP für die Wagenbodenblechmodelle $R_{\max, X \% , 1 \dots 25}$ und $R_{\min, X \% , 1 \dots 25}$ bzgl. des Basismodells für Massenerhöhungen um 0,1 kg und um 0,01 kg bei Untersuchung des Massen- und Steifigkeitseinflusses	104
5.45	Verhältnis des maximalen Real- und Imaginärteils der Geschwindigkeit \underline{v}_z über der Anregungsmoden n für das Wagenbodenblech	105
5.46	Zusammenfassung der maximal erzielbaren Pegeldifferenzen der ERP beim Wagenbodenblech für alle Auslegungsmoden, alle Modifikationseinstellungen sowie alle drei Modifikationsfälle bei verschiedenen hohen Anforderungen an die maximal erlaubte Verschiebung der Eigenfrequenzen	105
5.47	standardisiertes Produkt aus Real- und Imaginärteil der gemessenen Schwinggeschwindigkeit für die zwei Anregungsmoden mit eingezeichneter Modifikationsposition . . .	106
5.48	modifizierte Platte mit unterschiedlichen großen Modifikationen	107
5.49	ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP der modifizierten Platten bzgl. des Basismodells bei Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl 0,1 m \times 0,1 m großer Modifikationen .	108
5.50	standardisiertes Produkt aus Real- und Imaginärteil der gemessenen Schwinggeschwindigkeit für die Anregungsmoden 13 nach Plattenumbau	109
5.51	ERP-Pegel und Pegeldifferenz der ERP der modifizierten Platten bzgl. des Basismodells bei Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl 0,05 m \times 0,05 m großer Modifikationen	110
5.52	Vergleich des Betrags der Betriebsschwingformen zwischen dem Basismodell und drei modifizierten Gepäckraumbodenmodellen	111
A.1	Eigenschwingformen, Betriebsschwingformen und Strukturintensität der Platte für $n \in [1 \ 5]$	118
A.2	Eigenschwingformen, Betriebsschwingformen und Strukturintensität der Platte für $n \in [6 \ 15]$	119
A.3	Eigenschwingformen, Betriebsschwingformen und Strukturintensität der Platte für $n \in [16 \ 25]$	120
A.4	Eigenschwingformen, Betriebsschwingformen und Strukturintensität des Gepäckraumbodens für $n \in [1 \ 4]$	121
A.5	Eigenschwingformen, Betriebsschwingformen und Strukturintensität des Gepäckraumbodens für $n \in [5 \ 12]$	122
A.6	Eigenschwingformen, Betriebsschwingformen und Strukturintensität des Gepäckraumbodens für $n \in [12 \ 20]$	123
A.7	Eigenschwingformen, Betriebsschwingformen und Strukturintensität des Gepäckraumbodens für $n \in [21 \ 25]$	124
A.8	Schallleistungspegel und Schallleistungspegeldifferenz bzgl. $8E/\lambda$ der Platte bei einem dimensionslosen Luftradius von $kr_{\text{Luft}} = 10$ für verschiedene Elementanzahlen E pro Wellenlänge λ	126
A.9	Elementanzahl des Luftmodells bei einem dimensionslosen Luftradius von $kr_{\text{Luft}} = 10$ für verschiedene Elementanzahlen E pro Wellenlänge λ	126
A.10	Schallleistungspegel und Schallleistungspegeldifferenz bzgl. $kr_{\text{Luft}} = 10$ der Platte bei einer Vernetzung von 8 Elementen pro Wellenlänge für verschiedene dimensionslose Luftradien kr_{Luft}	126
A.11	Elementanzahl des Luftmodells bei einer Vernetzung von 8 Elementen pro Wellenlänge für verschiedene dimensionslose Luftradien kr_{Luft}	126
A.12	Mittelwert und Standardabweichung der Korrelationswerte aller Anregungsmoden für das gesamte STI-Vektorfeld	128
A.13	ERP-Skalarfelder der Platte für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [1 \ 7]$	130

A.14	ERP-Skalarfelder der Platte für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [8\ 16]$	131
A.15	ERP-Skalarfelder der Platte für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [17\ 25]$	132
A.16	ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [1\ 6]$	133
A.17	ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [7\ 13]$	134
A.18	ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [14\ 20]$	135
A.19	ERP-Skalarfelder des Gepäckraumbodens für alle drei Modifikationsfälle sowie der Summe der ersten beiden Modifikationsfälle für $n \in [21\ 25]$	136

Tabellenverzeichnis

2.1	Prinzipien zur Schallreduktion (im Falle einer konstanten Kraftanregung)	19
3.1	Materialparameter der Platte (Stahl)	22
3.2	Werte der Modellparameter der Modellgruppe „Platte mit Skin-Rippe“	34
4.1	Ergebnisse der Korrelationsauswertung der skalaren Kenngrößen untereinander	43
4.2	Grenzwerte für die Elementauswahl beider Selektionsvarianten	53
4.3	Modifikationsgrößen für die verschiedenen Grenzwerte beider Selektionsvarianten für die Platte	53
4.4	Modifikationsgrößen für die verschiedenen Grenzwerte der Selektionsvariante 1 für den Gepäckraumboden	54
4.5	Angabe der konstant gehaltenen Größen und ihre Werte in den Modifikationseinstellungen für Platte und Gepäckraumboden	54
5.1	Einstellungen der Materialparameter der drei Modifikationsfälle für die Erstellung der ERP-Skalarfelder	63
5.2	Grenzwerte für die Elementauswahl anhand der minimalen und maximalen ERP	69
5.3	Angabe der konstant gehaltenen Größen mit ihren Werten in den Modifikationseinstellungen für alle drei Modifikationsfälle für Platte und Gepäckraumboden	70
A.1	Eigenfrequenzen der Platte	118
A.2	Eigenfrequenzen des Gepäckraumbodens	121
A.3	gemessene Resonanzfrequenzen der Platte	125
A.4	Berechnungsvorschrift der skalaren Kenngrößen	127
A.5	Werte für Masse und Materialparameter bei unterschiedlichen Modifikationseinstellungen für die Plattenmodelle $FD_{A,X\%,1...25}$	129
A.6	Werte für Masse und Materialparameter bei unterschiedlichen Modifikationseinstellungen für die Plattenmodelle $FD_{max,X\%,1...25}$	129
A.7	Werte für Masse und Materialparameter bei unterschiedlichen Modifikationseinstellungen für die Gepäckraumbodenmodelle $FD_{A,X\%,1...25}$	129
A.8	Werte für Masse und Materialparameter bei unterschiedlichen Modifikationseinstellungen für die Plattenmodelle $ERP_{min,X\%,1...25}$ und $ERP_{max,X\%,1...25}$	137
A.9	Werte für Masse und Materialparameter bei unterschiedlichen Modifikationseinstellungen für die Gepäckraumbodenmodelle $ERP_{min,X\%,1...25}$ und $ERP_{max,X\%,1...25}$	137
A.10	verwendete Optimierungseinstellungen des genetischen Algorithmus	138

Abkürzungsverzeichnis

ABH	akustisches schwarzes Loch (acoustic black hole)
ADS	akustische Designsensitivität (acoustical design sensitivity)
AF	Anregungsfrequenz
ANC	aktive Lärmkontrolle (active noise control)
ASAC	aktiver strukturakustischer Eingriff (active structural acoustic control)
AVC	aktive Schwingungskontrolle (active vibration control)
arith	arithmetisch
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BM	Biegemoment
BSF	Betriebsschwingform
EF	Eigenfrequenz
ERP	äquivalent abgestrahlte Schallleistung (equivalent radiated power)
FD	Flussdichte
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FR	Flussrichtung
GB	Gepäckraumboden
IP	In-plane
Kap.	Kapitel
max	maximal, Maximum
mag	magnitude (Betrag)
med	Median
min	minimal, Minimum
N	Normalkraft
NI	National Instruments
norm	normiert
OOP	Out-of-plane
PSV	Polytec Scanning Vibrometer
Q	Querkraft
re	Referenzwertangabe (relative)
RMS	Effektivwert (root mean square)
RMSL	effektiver Körperschallpegel (root mean square level of structure borne sound)
SI	Schallintensität
STI	Strukturintensität
std	Standardabweichung
sum	summiert
TM	Torsionsmoment
WBB	Wagenbodenblech

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	m^2	Fläche
A_{ges}	m^2	Gesamtfläche
A_i	m^2	Fläche des i -ten Elementes
A_{Skin}	m^2	Fläche der Skin-Modifikation
$A_{Y\sigma, FD_{med}}$, $A_{Y\sigma, FD_{norm, med}}$	-	prozentualer Flächenanteil bezogen auf ein $Y\sigma$ -Streuband um den Median der Flussdichte bzw. der normierten Flussdichte in Schalen
$A_{ZFD_{max}}$, $A_{ZFD_{norm, max}}$	-	prozentualer Flächenanteil bezogen auf das Maximum der Flussdichte bzw. der normierten Flussdichte in Schalen
a_{xRip} , a_{yRip}	m	Position der Skin-Rippe in x - bzw. y -Richtung
b_{Rip}	m	Breite der Skin-Rippe
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
d	-	Dämpfung
E	-	Elementanzahl
E	-	Menge der Elementindizes aller Elemente
E	N/m^2	Elastizitätsmodul
E_F	-	Menge der Elementindizes der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt
E_{Skin}	N/m^2	Elastizitätsmodul der Skin
E_Y	-	Menge der Elementindizes aller Elemente, für die $FD_{med} - Y \cdot FD_{\sigma} \leq FD_i \leq FD_{med} + Y \cdot FD_{\sigma}$ gilt
E_Z	-	Menge der Elementindizes aller Elemente, für die $FD_i \geq Z \cdot FD_{max}$ gilt
ERP_{diff}	W	Skalarfeld der ERP-Differenzen bzgl. des Basismodells
$ERP_{min, n}$	-	Name der anhand der ERP-Skalarfelder modifizierten Modelle bei Elementauswahl anhand der Minima für Vergleich mit anhand Expertenwissen modifizierten Modellen ($n = 1 \dots 25$, wenn die Gesamtheit aller n Modelle gemeint ist)
$ERP_{min, X\%, n}$	-	Name der anhand der ERP-Skalarfelder modifizierten Modelle bei Elementauswahl anhand der Minima ($n = 1 \dots 25$, wenn die Gesamtheit aller n Modelle gemeint ist)
$ERP_{max, n}$	-	Name der anhand der ERP-Skalarfelder modifizierten Modelle bei Elementauswahl anhand der Maxima für Vergleich mit anhand Expertenwissen modifizierten Modellen ($n = 1 \dots 25$, wenn die Gesamtheit aller n Modelle gemeint ist)
$ERP_{max, X\%, n}$	-	Name der anhand der ERP-Skalarfelder modifizierten Modelle bei Elementauswahl anhand der Maxima ($n = 1 \dots 25$, wenn die Gesamtheit aller n Modelle gemeint ist)
F	N	Anregungskraft
F_z	N	Anregungskraft in z -Richtung
FD	W/m	Flussdichte in Schalen

$FD_{A,X \% , n}$	-	Name der anhand der STI modifizierten Modelle bei Elementauswahl anhand Selektionsvariante 1 ($n = 1 \dots 25$, wenn die Gesamtheit aller n Modelle gemeint ist)
$FD_{arith}, FD_{norm,arith}$	W/m	arithmetischer Mittelwert der Flussdichte bzw. der normierten Flussdichte in Schalen
$FD_{F,arith}$	W/m	arithmetischer Mittelwert der Flussdichte der vier Elemente um den Kraftangriffspunkt in Schalen
FD_{IP}, FD_{OOP}	W/m	In-plane-, Out-of-plane-Anteil der Flussdichte in Schalen
FD_{BM}, FD_{TM}, FD_Q	W/m	Biegemoment-, Torsionsmoment- bzw. Querkraft-Anteil der Flussdichte in Schalen
$FD_{IP,norm}, FD_{OOP,norm}$	W/m	In-plane-, Out-of-plane-Anteil der normierten Flussdichte in Schalen
$FD_{BM,norm}, FD_{TM,norm}, FD_{Q,norm}$	W/m	Biegemoment-, Torsionsmoment- bzw. Querkraft-Anteil der normierten Flussdichte in Schalen
FD_i	W/m	Flussdichte in Schalen des i -ten Elementes
FD_{max}	W/m	maximale Flussdichte in Schalen
$FD_{max,X \% , n}$	-	Name der anhand der STI modifizierten Modelle bei Elementauswahl anhand Selektionsvariante 2 ($n = 1 \dots 25$, wenn die Gesamtheit aller n Modelle gemeint ist)
$FD_{med}, FD_{norm,med}$	W/m	Median der Flussdichte bzw. der normierten Flussdichte in Schalen
FD_{min}	W/m	minimale Flussdichte in Schalen
FD_{norm}	W/m	normierte Flussdichte in Schalen
$FD_{Schiefe}, FD_{norm,Schiefe}$	W/m	Schiefe der Flussdichte bzw. der normierten Flussdichte in Schalen
$FD_{sum}, FD_{norm,sum}$	W/m	aufsummierte Flussdichte bzw. aufsummierte normierte Flussdichte in Schalen
$FD_{sum}^2, FD_{norm,sum}^2$	W ² /m ²	quadratisch aufsummierte Flussdichte bzw. quadratisch aufsummierte normierte Flussdichte in Schalen
$FD_{Y\sigma}, FD_{med}, FD_{Y\sigma,FD_{norm,med}}$	W/m	prozentualer Flussdichteanteil bezogen auf ein $Y\sigma$ -Streuband um den Median der Flussdichte bzw. der normierten Flussdichte in Schalen
$FD_{\sigma}, FD_{norm,\sigma}$	W/m	Streuung der Flussdichte bzw. der normierten Flussdichte in Schalen
FR	°	Flussrichtung in Schalen
f	Hz	Frequenz
f_{AF}, f_{AFn}	Hz	Anregungsfrequenz, n -te Anregungsfrequenz
f_{EF}, f_{EFn}	Hz	Eigenfrequenz, n -te Eigenfrequenz
f_k	Hz	Koinzidenzgrenzfrequenz
$f_{I,II}$	Hz	Übergangsfrequenz zwischen Kolbenstrahlerbereich und Kurzschlussbereich
$f(\vec{\beta})$	-	Zielfunktion in Optimierung
$G_{x,y}$	$[x] \cdot [y]$	einseitiges Kreuzleistungsdichtespektrum von x und y
g_{Skin}	-	Geometrieeinfluss der Skin
h	m	(Schalen-)Dicke
h_{Rip}	m	Dicke der Skin-Rippe

h_{Skin}	m	Dicke der Skin
\vec{I}	W/m ²	Vektor der Schallintensität
I_n	W/m ²	Normalanteil des Vektors der Schallintensität \vec{I}
\vec{I}_S	W/m ²	Vektor der Strukturintensität
$I_{S,x}, I_{S,y}, I_{S,z}$	W/m ²	Komponenten des Vektors der Strukturintensität \vec{I}_S
$\vec{I}_{S,a}$	W/m ²	Vektor der aktiven Strukturintensität
$\vec{I}_{S,r}$	W/m ²	Vektor der reaktiven Strukturintensität
$\vec{I}_{S'}$	W/m	Vektor der Strukturintensität in Schalen
$I_{S',x}, I_{S',y}$	W/m	Komponenten des Strukturintensitätsvektors in Schalen $\vec{I}_{S'}$
$\vec{I}_{S',a}$	W/m	Vektor der aktiven Strukturintensität in Schalen
$I_{S',a,x}, I_{S',a,y}$	W/m	Komponenten des aktiven Strukturintensitätsvektors in Schalen $\vec{I}_{S',a}$
$\vec{I}_{S',a,\text{ref}}$	W/m	Referenzvektor der aktiven Strukturintensität in Schalen
$I_{S',a,\text{ref},x}, I_{S',a,\text{ref},y}$	W/m	Komponenten des Referenzvektors der aktiven Strukturintensität in Schalen $\vec{I}_{S',a,\text{ref}}$
i	-	Laufvariable, Platzhalterindex
K	-	lineare Korrelation nach Bravais-Pearson
K_{arith}	-	Mittelwert der linearen Korrelation nach Bravais-Pearson
K_{dB}	-	lineare Korrelation nach Bravais-Pearson von Pegelgrößen
K_{ges}	-	lineare Korrelation nach Bravais-Pearson bei Verwendung aller Regressoren \vec{X}_q
K_{red}	-	lineare Korrelation nach Bravais-Pearson nach Reduktion der Regressoren \vec{X}_q
K_{std}	-	Standardabweichung der linearen Korrelation nach Bravais-Pearson
k	(N/m)	(Feder-)Steifigkeit
k	1/m	Wellenzahl
l_E	m	Kantenlänge eines FE-Elementes
l_{Rip}	m	Länge der Skin-Rippe
l_x, l_y, l_z	m	Modellabmessungen (Länge, Breite bzw. Höhe)
$\underline{M}_x, \underline{M}_y, \underline{M}_{xy}, \underline{M}_{yx}$	N	komplexe Schnittmomente (Biege-/Torsionsmomente)
$\underline{\underline{M}}_x, \underline{\underline{M}}_y, \underline{\underline{M}}_{xy}$	N	Gesamtheit (gesamte Struktur) der komplexen Schnittmomente (Biege-/Torsionsmomente, jeweils Realteil $\underline{\underline{M}}_{i,\text{re}}$ und Imaginärteil $\underline{\underline{M}}_{i,\text{im}}$ betrachtet)
m	kg	Masse
m_{Skin}	kg	Masse der Skin
N	-	Anzahl
N_E	-	Anzahl der Elemente in der Menge E
N_{E_Y}	-	Anzahl der Elemente in der Menge E_Y
N_{E_Z}	-	Anzahl der Elemente in der Menge E_Z
N_f	-	Anzahl der Schwingspiele
N_{red}	-	Anzahl der Regressoren nach Reduktion der Regressoren \vec{X}_q
N_{reg}	-	Anzahl der Regressionsdurchläufe zur Reduktion der Regressoren \vec{X}_q
N_{Wirbel}	-	Anzahl der Wirbel

$\underline{N}_x, \underline{N}_y, \underline{N}_{xy}$	N/m	komplexe Schnittkräfte (Normalkräfte)
$\underline{N}_x, \underline{N}_y, \underline{N}_{xy}$	N/m	Gesamtheit (gesamte Struktur) der komplexen Schnittkräfte (Normalkräfte, jeweils Realteil $N_{i, \text{re}}$ und Imaginärteil $N_{i, \text{im}}$ betrachtet)
n	-	Laufvariable
\vec{n}	-	Normalenvektor
P	W	(tatsächlich abgestrahlte) Schallleistung
P_{diss}	W	dissipierte Leistung
P_{ein}	W	Eingangsleistung
P_{ERP}	W	äquivalent abgestrahlte Schallleistung
$P_{\text{ges}}, P_{\text{I}}, P_{\text{II}}$	W	Schallleistung der gesamten Struktur, des Strukturbereichs I bzw. des Strukturbereichs II
$P_{\text{I} \rightarrow \text{II}}$	W	Leistungsübertrag von Strukturbereich I nach II
p	N/m ²	Schalldruck
$\underline{Q}_x, \underline{Q}_y$	N/m	komplexe Schnittkräfte (Querkräfte)
$\underline{Q}_x, \underline{Q}_y$	N/m	Gesamtheit (gesamte Struktur) der komplexen Schnittkräfte (Querkräfte, jeweils Realteil $Q_{i, \text{re}}$ und Imaginärteil $Q_{i, \text{im}}$ betrachtet)
R_k	-	Approximationslösung der ERP-Skalarfelder des reinen Steifigkeitseinflusses
R_m	-	Approximationslösung der ERP-Skalarfelder des reinen Masseneinflusses
R_{mk}	-	Approximationslösung der ERP-Skalarfelder des Massen- und Steifigkeitseinflusses
$R_{\text{min}, X \% , n}$	-	Name der anhand der Approximationslösungen modifizierten Modelle bei Elementauswahl anhand der Minima ($n = 1 \dots 25$, wenn die Gesamtheit aller n Modelle gemeint ist)
$R_{\text{max}, X \% , n}$	-	Name der anhand der Approximationslösungen modifizierten Modelle bei Elementauswahl anhand der Maxima ($n = 1 \dots 25$, wenn die Gesamtheit aller n Modelle gemeint ist)
R_{red}^2	-	Bestimmtheitsmaß der Regression nach Reduktion der Regressoren \vec{X}_q
r_{Luft}	m	Radius der Luft(halb)kugel
S	m ²	Hüllfläche, schallabstrahlende Oberfläche
\underline{S}	N/m ²	Spannungstensor
\underline{SG}_i	N/m, N	i -te komplexe Schnittgröße (Schnittkraft oder -moment)
\vec{SG}_i	N/m, N	in Vektor umgeformte i -te komplexe Schnittgröße \underline{SG}_i
$\vec{SG}_{i, \text{im}}, \vec{SG}_{i, \text{re}}$	N/m, N	Imaginär- bzw. Realteil der in einen Vektor umgeformten i -ten komplexen Schnittgröße \underline{SG}_i
t	s	Zeit
t_{mess}	s	Messdauer
\underline{U}	m	Eigenschwingform
\underline{U}_z	m	z -Komponente der Eigenschwingform \underline{U}
u_z	m	z -Komponente des Vektors der Verschiebung \vec{u}

\underline{V}	m/s	komplexe Betriebsschwingform (Gesamtheit der Schwinggeschwindigkeiten)
$V_{\text{abs,mag}}$	m/s	Skalarfeld der Schwinggeschwindigkeiten \underline{V} (Betrag in Bettragsrichtung)
$V_{\text{n,mag}}$	m/s	Skalarfeld der Schwinggeschwindigkeiten \underline{V} (Betrag in Normalenrichtung)
$V_{\text{n,mag,max}, n}$	m/s	Name der anhand der Schwinggeschwindigkeits-Skalarfelder modifizierten Modelle bei Elementauswahl anhand maximaler $V_{\text{n,mag}}$ ($n = 1 \dots 25$, wenn die Gesamtheit aller n Modelle gemeint ist)
\underline{V}_z	m/s	z -Komponente der komplexen Betriebsschwingform \underline{V}
$V_{z,\text{re}}, V_{z,\text{im}}$	m/s	Real- bzw. Imaginärteil der z -Komponente der Betriebsschwingform \underline{V}
$V_{z,\text{re,std}}, V_{z,\text{im,std}}$	-	standardisierter Real- bzw. Imaginärteil der lokalen z -Komponente der Betriebsschwingform \underline{V}
$V_{z,\text{mag}}$	m/s	Betrag (Amplitude) der z -Komponente der Betriebsschwingform \underline{V}
\vec{v}, \underline{v}	m/s	Vektor der (translatorischen) Schwinggeschwindigkeit
v_{ein}	m/s	Schwinggeschwindigkeit am Anregungsort
v_n, \underline{v}_n	m/s	Normalanteil der (translatorischen) Schwinggeschwindigkeit \vec{v} bzw. \underline{v}_n
$v_{n,\text{mag}}$	m/s	Betrag (Amplitude) des Normalanteils der (translatorischen) Schwinggeschwindigkeit \underline{v}_n
\vec{v}_p	m/s	Vektor der Schallschnelle
$v_{p,n}$	m/s	Normalanteil der Schallschnelle \vec{v}_p
v_x, v_y, v_z	m/s	Komponenten des Vektors der (translatorischen) Schwinggeschwindigkeit \vec{v}
$v_{z,\text{re}}, v_{z,\text{im}}, v_{z,\text{abs}}$	m/s	Real-, Imaginärteil bzw. Amplitude der z -Komponente des Vektors der (translatorischen) Schwinggeschwindigkeit \vec{v}
$v_{z,F,\text{abs}}$	m/s	Amplitude der z -Komponente des Vektors der (translatorischen) Schwinggeschwindigkeit am Anregungsort
\underline{VG}_j	m/s, rad/s	j -te komplexe Schwinggeschwindigkeitsgröße (translatorische oder rotatorische Schwinggeschwindigkeit)
\overrightarrow{VG}_j	m/s, rad/s	in Vektor umgeformte j -te komplexe Schwinggeschwindigkeitsgröße \underline{VG}_j
$\overrightarrow{VG}_{j,\text{im}}, \overrightarrow{VG}_{j,\text{re}}$	m/s, rad/s	Imaginär- bzw. Realteil der in einen Vektor umgeformten j -ten komplexen Schwinggeschwindigkeitsgröße \underline{VG}_j
X	%	Grenzwert für Elementselektion (Flächenvorgabe oder Flussdichtevorgabe)
X, Y, Z	-	Platzhalter
\mathbf{X}	$[\mathbf{X}]$	Matrix aller Regressoren \vec{X}_q inklusive Konstantanteil
\vec{X}_q	$[\vec{X}_q]$	Vektor des q -ten Regressors
x, y, z	-	Koordinatenrichtungen
\vec{x}, \vec{y}	$[x], [y]$	Vektorvariablen
$x_{\text{arith}}, y_{\text{arith}}$	$[x], [y]$	arithmetische Mittelwerte der Vektorvariablen
x_i, y_i	$[x], [y]$	Komponenten der Vektorvariablen

$x_{F_z}, y_{F_z}, z_{F_z}$	m	Koordinaten des Anregungsortes
\vec{Y}	$[\vec{Y}]$	Vektor des Regressanden
Z_{ein}	N/(m/s)	Eingangsimpedanz, Name der Modelle mit Modifikation am Kraftangriffspunkt
$Z_{\text{I} \rightarrow \text{II}}$	N/(m/s)	Impedanzsprung zwischen Strukturbereich I und II

Griechische Buchstaben

α	-	Regressionskoeffizient des Konstantanteils
$\vec{\beta}$	-	Vektor aller Regressionskoeffizienten α und β_q
β_q	-	q -ter Regressionskoeffizient
$\Delta \text{FD}_{F, \text{arith} - \text{arith}},$ $\Delta \text{FD}_{F, \text{norm}, \text{arith} - \text{norm}, \text{arith}}$	W/m	Differenz zwischen dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte und dem arithmetischen Mittelwert der Flussdichte der 4 Elemente um den Kraftangriffspunkt bzw. der jeweils normierten Flussdichten in Schalen
$\vec{\epsilon}$	-	Vektor des Fehlerterms/Rests
η	-	Strukturdämpfung (Verlustfaktor)
λ	m	Wellenlänge
μ	-	Querkontraktionszahl
ρ	kg/m ³	Dichte
ρ_{Skin}	kg/m ³	Dichte der Skin
σ	-	Abstrahlgrad
σ	-	Streuung
σ_{ii}	N/m ²	ii -te Normalspannungskomponente des Spannungstensors \mathbf{S}
τ_{ij}	N/m ²	ij -te Schubspannungskomponente des Spannungstensors \mathbf{S}
φ_{Rip}	°	Ausrichtung der Skin-Rippe
φ_x, φ_y	rad	Rotationswinkel
$\vec{\varphi}$	rad/s	Vektor der rotatorischen Schwinggeschwindigkeit
$\dot{\varphi}_x, \dot{\varphi}_y, \dot{\varphi}_z$	rad/s	Komponenten des Vektors rotatorischen Schwinggeschwindigkeit $\vec{\varphi}$

Mathematische Operatoren

\underline{X}	Tensorgröße
X_{arith}	arithmetischer Mittelwert der Größe X
X_{std}	Standardabweichung der Größe X
$[XY]_{\text{std}}$	standardisiertes Produkt XY
\vec{x}	Vektorgroße
\dot{x}	zeitlich abgeleitete Größe
\underline{x}	komplexe Größe
\underline{x}^*	konjugiert komplexe Größe
$\text{Im} \{ \underline{x} \}, \underline{x}_{\text{im}}$	Imaginärteil der komplexen Größe
$\text{Re} \{ \underline{x} \}, \underline{x}_{\text{re}}$	Realteil der komplexen Größe
x_{RMS}	Effektivwert

x_0	Referenzwert der Größe x
$ x $	Betrag einer Größe
$f(x)$	Funktion von x
Δx	Änderung von x

Literaturverzeichnis

- [1] **Kollmann, F., Schösser, T. und Angert, R. (2006):** Praktische Maschinenakustik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [2] **Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (2018):** Lärm – Grenzwerte, Beurteilungskriterien. URL: https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefahrungsbeurteilung/Expertenwissen/Physikalische-Einwirkungen/Laerm/Laerm_dossier.html?pos=2, besucht am 02.07.2018.
- [3] **Hessische/Niedersächsische Allgemeine (HNA) (2016):** Leiser und detailreich: Neue Hausgeräte auf der IFA. URL: <https://www.hna.de/netzwelt/leiser-und-detailreich-neue-hausgeraete-auf-ifa-zr-6693891.html>, besucht am 02.07.2018.
- [4] **Zeller, P. (2018):** Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 3. Aufl.
- [5] **Jaber, M., Schneeweiss, H., Bös, J. und Melz, T. (2015):** Efficient damping treatment for structure-borne noise reduction in vehicles. In: *Noise and vibration: Emerging methods (NOVEM 2015)*. Dubrovnik, Kroatien, 13.–15. April, S. 49859–1–49859–13.
- [6] **Phelps, L. (1906):** Muffler, U.S. Patent 821 828, Anmeldung: 10.04.1905.
- [7] **Mock, F. (1915):** Apparatus for muffling sound, U.S. Patent 1 144 306, Anmeldung: 15.06.1910.
- [8] **Sabine, W. und Guastavino, R. (1914):** Wall and ceiling of auditoriums and the like, U.S. Patent 1 119 543, Anmeldung: 17.02.1913.
- [9] **Sabine, W. (1916):** Sound-absorbing wall or ceiling, U.S. Patent 1 205 939, Anmeldung: 29.11.1915.
- [10] **Sabine, W. (1918):** Sound-absorbing block or tile, U.S. Patent 1 284 933, Anmeldung: 11.12.1915.
- [11] **Darragh, Jr, J. (1941):** Sound and vibration insulation for aircraft cabins, U.S. Patent 2 263 919, Anmeldung: 21.19.1939.
- [12] **Kletschkowski, T. und Sachau, D. (2011):** AVC, ASAC oder ANC? Über ein einfaches Ersatz-Modell zum Vergleich aktiver Maßnahmen zur Lärminderung in der Flugzeugkabine. In: *37. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2011)*. Düsseldorf, 21.–24. April, S. 349–350.
- [13] **Elliott, S. (1994):** Active control of structure-borne noise. In: *Journal of Sound and Vibration*. 177 (5), S. 651–673.
- [14] **Marburg, S. (2004):** Kap. A survey of applications in structural-acoustic optimization for passive noise control with a focus on optimal shell contour. In: *Advances in Dynamics and Control*. Hrsg. S. Sivasundaram. CRC Press, Boca Raton.
- [15] **Constans, E., Belegundu, A. und Koopmann, G. (1998):** Design approach for minimizing sound power from vibrating shell structures. In: *AIAA Journal*. 6 (2), S. 134–139.
- [16] **Marburg, S., Shepherd, M. und Hambric, S. (2016):** Kap. Structural–acoustic optimization. In: *Engineering vibroacoustic analysis: methods and applications*. Hrsg. S.A. Hambric, S.H. Sung und D.J. Nefske. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, West Sussex.
- [17] **Christensen, P. und Klarbring, A. (2009):** An introduction to structural optimization. Springer Science+Business Media, LLC, New York.
- [18] **Ranjbar, M. (2011):** Eine vergleichende Studie zur Optimierung in der Strukturakustik. Dissertation, Technischen Universität Dresden.
- [19] **Marburg, S. (2002):** Developments in structural-acoustic optimization for passive noise control. In: *Archives of Computational Methods in Engineering*. 9 (4), S. 291–370.
- [20] **Ranjbar, M., Marburg, S. und Hardtke, H.-J. (2012):** Structural-acoustic optimization of a rectangular plate: A tabu search approach. In: *Finite Elements in Analysis and Design*. 50, S. 142–146.

-
- [21] **Marburg, S. und Hardtke, H.-J. (2001)**: Shape optimization of a vehicle hat-shelf: Improving acoustic properties for different load cases by maximizing first eigenfrequency. In: *Computers & Structures*. 79 (20), S. 1943–1957.
- [22] **Jog, C. (2002)**: Topology design of structures subjected to periodic loading. In: *Journal of Sound and Vibration*. 253 (3), S. 687–709.
- [23] **Hering, T. (2012)**: Strukturintensitätsanalyse als Werkzeug der Maschinenakustik. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- [24] **Rattle, A. und Berry, A. (1998)**: Use of genetic algorithms for the vibroacoustic optimization of a plate carrying point-masses. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*. 104 (6), S. 3385–3397.
- [25] **Bös, J. und Nordmann, R. (2003)**: Numerical structural optimization with respect to the reduction of structure borne sound using various spline formulations. In: *Acta Acustica united with Acustica*. 89 (1), S. 39–52.
- [26] **Bös, J. (2006)**: Numerical optimization of the thickness distribution of three-dimensional structures with respect to their structural acoustic properties. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 32, S. 12–30.
- [27] **Rousounelos, A., Walsh, S., Krylov, V. und Horner, J. (2015)**: Optimisation of the structural modes of automotive-type panels using line stiffeners and point masses to achieve weak acoustic radiation. In: *Applied Acoustics*. 93, S. 23–37.
- [28] **Klaerner, M., Marburg, S. und Kroll, L. (2013)**: Simulative measures for structure borne sound radiation of composites. In: *21st International Congress on Acoustics (ICA 2013)*. Montreal, Kanada, 2.–7. Juni 2013.
- [29] **Sepahvand, K., Scheffler, M. und Marburg, S. (2015)**: Uncertainty quantification in natural frequencies and radiated acoustic power of composite plates: Analytical and experimental investigation. In: *Applied Acoustics*. 87, S. 23–29.
- [30] **Fender, G., Marburg, S. und Duddeck, F. (2016)**: Identification of a set of candidate solutions for optimal positioning of damping layers. In: *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*. 9 (3), S. 987–994.
- [31] **Klaerner, M., Wuehrl, M., Kroll, L. und Marburg, S. (2017)**: FEA-based methods for optimising structure-borne sound radiation. In: *Mechanical Systems and Signal Processing*. 89, S. 37–47.
- [32] **Millithaler, P., Dupont, J.-B., Ouisse, M., Sadoulet-Reboul, É. und Bouhaddi, N. (2017)**: Viscoelastic property tuning for reducing noise radiated by switched-reluctance machines. In: *Journal of Sound and Vibration*. 407, S. 191–208.
- [33] **Serhat, G. und Basdogan, I. (2018)**: Design of curved composite panels for optimal dynamic response using lamination parameters. In: *Composites Part B: Engineering*. 147, S. 135–146.
- [34] **Mazloomi, M., Ranjbar, M., Boldrin, L., Scarpa, F., Patsias, S. und Ozada, N. (2018)**: Vibroacoustics of 2D gradient auxetic hexagonal honeycomb sandwich panels. In: *Composite Structures*. 187, S. 593–603.
- [35] **Serhat, G. und Basdogan, I. (2016)**: Comparison of vibro-acoustic performance metrics in the design and optimization of stiffened composite fuselages. In: *45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (inter-noise 2016)*. Hamburg, 21.–24. August, S. 6079–6090.
- [36] **Luegmair, M. und Münch, H. (2015)**: Advanced equivalent radiated power (ERP) calculation for early vibro-acoustic product optimization. In: *The 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22)*. Florenz, Italien, 12.–16. Juli.
- [37] **Unruh, O., Blech, C. und Monner, H. (2015)**: Numerical and experimental study of sound power reduction performance of acoustic black holes in rectangular plates. In: *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*. 8 (3), S. 956–963.

-
- [38] **Rothe, S. und Langer, S. (2017):** An approach to use the structural intensity for acoustical topology optimization. In: *12th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*. Braunschweig, 5.–9. Juni.
- [39] **Sors, T. und Elliott, S. (2002):** Volume velocity estimation with accelerometer arrays for active structural acoustic control. In: *Journal of Sound and Vibration*. 258 (5), S. 867–883.
- [40] **da Silva, L., Deü, J.-F., Larbi, W. und Trindade, M. (2012):** An efficient finite element approach for reduction of structural vibration and acoustic radiation by passive shunted piezoelectric systems. In: *10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2012)*. São Paulo, Brasilien, 8.–13. Juli.
- [41] **Fritze, D., Marburg, S. und Hardtke, H.-J. (2003):** Reducing radiated sound power of plates and shallow shells by local modification of geometry. In: *Acta Acoustica united with Acoustica*. 89, S. 53–60.
- [42] **Kumar, G., Walsh, S. J. und Krylov, V. V. (2013):** Structural–acoustic behaviour of automotive-type panels with dome-shaped indentations. In: *Applied Acoustics*. 74 (6), S. 897–908.
- [43] **McMillan, A. und Keane, A. (1997):** Vibration isolation in a thin rectangular plate using a large number of optimally positioned point masses. In: *Journal of Sound and Vibration*. 202 (2), S. 219–234.
- [44] **McMillan, A. und Keane, A. (1996):** Shifting resonances from a frequency band by applying concentrated masses to a thin rectangular plate. In: *Journal of Sound and Vibration*. 192 (2), S. 549–652.
- [45] **Zhang, P., Wu, H., Ji, L. und Jokic, M. (2017):** A study on the effects of local added masses on the natural and the sound radiation characteristics of thin plate structures. In: *Transactions of FAMENA*. 40 (4), S. 25–39.
- [46] **Li, S. und Li, X. (2008):** The effects of distributed masses on acoustic radiation behavior of plates. In: *Applied Acoustics*. 69 (3), S. 272–279.
- [47] **Stoewer, T. (2016):** Berechnung der Strukturintensität von Fahrzeugstrukturen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- [48] **Cunefare, K. und Koopmann, G. (1992):** Acoustic design sensitivity for structural radiators. In: *ASME Journal of Vibration and Acoustics*. 114 (2), S. 178–186.
- [49] **Henn, H., Sinambari, G. und Fallen, M. (2008):** Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 4. Aufl.
- [50] **Verheij, J. (1980):** Cross spectral density methods for measuring structure borne power flow on beams and pipes. In: *Journal of Sound and Vibration*. 70 (1), S. 133–139.
- [51] **Maysenhölder, W. (1994):** Körperschallenergie: Grundlagen zur Berechnung von Energiedichten und Intensitäten. S. Hirzel Verlag Stuttgart/Leipzig.
- [52] **Ebert, J., Stoewer, T., Schaal, C., Bös, J. und Melz, T. (2014):** Efficient simulation of the active vibratory energy flow of structures in a given frequency band. In: *Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2014)*. Leuven, Belgien, 15.–17. September, S. 3723–3736.
- [53] **Ebert, J., Stoewer, T., Schaal, C., Bös, J. und Melz, T. (2015):** Opportunities and limitations on vibro-acoustic design of vehicle structures by means of energy flow-based numerical simulation. In: *Noise and vibration: Emerging methods (NOVEM 2015)*. Dubrovnik, Kroatien, 13.–15. April, S. 49798–1–49798–16.
- [54] **Möser, M., Kropp, W., Cremer, L. und Heckl, M. (2010):** Körperschall: Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3. Aufl.
- [55] **Romano, A., Abraham, P. und Williams, E. (1990):** A poynting vector formulation for thin shells and plates, and its application to structural intensity analysis and source localization. Part I: Theory. In: *Journal of the Acoustical Society of America*. 87 (3), S. 1166–1175.
- [56] **Merkel, M. und Öchsner, A. (2010):** Eindimensionale Finite Elemente: Ein Einstieg in die Methode. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

-
- [57] **Parra Pelaez, G. (2016):** Vergleich und Bewertung verschiedener numerischer Berechnungsmöglichkeiten der Strukturintensität. Master-Thesis, Technische Universität Darmstadt.
- [58] **Pierce, A. (2014):** Kap. Basic linear acoustics. In: *Handbook of acoustics*. Hrsg. T.D. Rossing. Springer Science+Business Media, LLC, New York, 2. Aufl.
- [59] **Kollmann, F. (2000):** Maschinenakustik: Grundlagen, Meßtechnik, Berechnung, Beeinflussung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Aufl.
- [60] **Fritze, D., Marburg, S. und Hardtke, H.-J. (2009):** Estimation of radiated sound power: a case study on common approximation methods. In: *Acta Acustica united with Acustica*. 95 (5), S. 833–842.
- [61] **Widmann, U. (2011):** Kap. Produktentstehungsprozess. In: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Hrsg. H.-H. Braess, U. Seidert. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 6. Aufl.
- [62] **Dassault Systèmes Simulia Corp. (2013):** Abaqus Analysis User's Guide. Version: Abaqus 6.13.
- [63] **Dassault Systèmes Simulia Corp. (2013):** Abaqus/CAE User's Guide. Version: Abaqus 6.13.
- [64] **Wahl, F., Schmidt, G. und Forrai, L. (1999):** On the significance of antiresonance frequencies in experimental structural analysis. In: *Journal of Sound and Vibration*. 219 (3), S. 379–394.
- [65] **Irretier, H. (2001):** Grundlagen der Schwingungstechnik 2: Systeme mit mehreren Freiheitsgraden, Kontinuierliche Systeme. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden.
- [66] **Schaal, C., Ebert, J., Bös, J. und Melz, T. (2016):** Relation between structural intensity-based scalars and sound radiation using the example of plate-rib models. In: *ASME Journal of Vibration and Acoustics*. 138 (4), S. 041011–1–041011–9.
- [67] **Schaal, C., Bös, J. und Melz, T. (2014):** Identifizierung signifikanter STI-basierter Skalare hinsichtlich einer verminderten Schallabstrahlung. In: *40. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2014)*. Oldenburg, 10.–13. März, S. 116–117.
- [68] **Kronthaler, F. (2016):** Statistik angewandt: Datenanalyse ist (k)eine Kunst mit dem R Commander. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [69] **FernUniversität in Hagen (2018):** Korrelationskoeffizient. URL: http://www.fernuni-hagen.de/ksw/neuestatistik/content/MOD_23196/html/comp_23414.html, besucht am 02.07.2018.
- [70] **Schaal, C., Groba, P., Bös, J. und Melz, T. (2018):** Bewertung der Schallabstrahlung dünnwandiger Strukturen anhand der Analyse der Strukturintensität. In: *44. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2018)*. München, 19.–22. März, S. 1239–1242.
- [71] **Schaal, C., Ebert, J., Bös, J. und Melz, T. (2015):** Analyse der Strukturintensität in akustisch verbesserten Strukturen. In: *41. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2015)*. Nürnberg, 16.–19. März, S. 830–833.
- [72] **Schaal, C., Ebert, J., Bös, J. und Melz, T. (2016):** Numerische Untersuchungen zur akustischen Wirkung diskreter Strukturänderungen mittels der Strukturintensität. In: *42. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2016)*. Aachen, 14.–17. März, S. 210–213.
- [73] **statista (2018):** Statistik-Lexikon: Definition Standardabweichung. URL: <https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/126/standardabweichung/>, besucht am 02.07.2018.
- [74] **Lange, T. und Mosler, K. (2017):** Statistik kompakt – Basiswissen für Ökonomen und Ingenieure. Springer-Lehrbuch. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.
- [75] **Mittag, H.-J. (2017):** Statistik – Eine Einführung mit interaktiven Elementen. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 5. Aufl.
- [76] **Kohn, W. (2005):** Statistik – Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [77] **Schäfer, T. (2016):** Methodenlehre und Statistik – Einführung in Datenerhebung, deskriptive Statistik und Inferenzstatistik. Springer Fachmedien, Wiesbaden.

-
- [78] **Schneider, H. (2009):** Kap. Nachweis und Behandlung von Multikollinearität. In: *Methodik der empirischen Forschung*. Hrsg. S. Albers, D. Klapper, U. Konradt, A. Walter und J. Wolf. Springer Fachmedien Wiesbaden, 3. Aufl.
- [79] **The MathWorks, Inc. (2017):** MATLAB Global Optimization Toolbox. Genetic Algorithm – Functions – ga. Version: R2017a. Natick, MA, USA.